
DIPLOMARBEIT

Herr
Uwe Sarbach

**Untersuchung von
Power Quality Messungen
an der Niederspannung in
Transformatorstationen am
Beispiel eines ausgewählten
Mittelspannungsringes der
SWE Netz GmbH mit Hinblick auf
zukünftige messtechnische
Anforderungen an
Transformatorstationen**

Mittweida, 2014

DIPLOMARBEIT

Untersuchung von Power Quality Messungen an der Niederspannung in Transformatorstationen am Beispiel eines ausgewählten Mittelspannungsringes der SWE Netz GmbH mit Hinblick auf zukünftige messtechnische Anforderungen an Transformatorstationen

Autor:

Herr Uwe Sarbach

Studiengang:

Informationstechnik

Seminargruppe:

KI10w1-F

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Parthier

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Thomas Schmidt

Einreichung:

Mittweida, 12.09.2014

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2014

Bibliografische Beschreibung:

Sarbach, Uwe:

Untersuchung von Power Quality Messungen an der Niederspannung in Transformatorstationen am Beispiel eines ausgewählten Mittelspannungsringes der SWE Netz GmbH mit Hinblick auf zukünftige messtechnische Anforderungen an Transformatorstationen, Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2014

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Auswertung der Spannungsqualität anhand eines exemplarischen Mittelspannungsringes. In jeder einzelnen Messung werden die charakteristischen Merkmale hervorgehoben und erläutert. Damit erfolgt mit Bezug auf die Spannungsqualität, die Ableitung bestimmter exemplarischer Verbrauchereigenschaften.

Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden die zukünftigen messtechnischen Anforderungen an Transformatorstationen beschrieben.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelverzeichnis.....	XV
0 Übersicht	1
0.1 <i>Motivation.....</i>	1
0.2 <i>Zielsetzung.....</i>	1
0.3 <i>Kapitelübersicht.....</i>	2
1 Einleitung.....	3
1.1 <i>Die SWE Netz GmbH.....</i>	5
2 Das elektrische Versorgungsnetz	7
2.1 <i>Die Bedeutung des elektrischen Versorgungsnetzes.....</i>	7
2.2 <i>Der Aufbau des elektrischen Versorgungsnetzes</i>	7
2.3 <i>Die Funktionsweise des elektrischen Versorgungsnetzes</i>	9
2.4 <i>Die momentane Netzsituation</i>	10
3 Power Quality	13
3.1 <i>Versorgungsqualität</i>	13
3.2 <i>Spannungsqualität.....</i>	14
3.3 <i>Merkmale der Europäischen Norm EN 50160</i>	14
3.3.1 <i>Netzfrequenz.....</i>	15
3.3.2 <i>Langsame Spannungsänderungen.....</i>	15
3.3.3 <i>Schnelle Spannungsänderungen.....</i>	15
3.3.4 <i>Flickerstärke.....</i>	15
3.3.5 <i>Unsymmetrie der Versorgungsspannung</i>	16
3.3.6 <i>Oberschwingungsspannung</i>	17
3.4 <i>Richtlinien für Erzeugungsanlagen</i>	17

3.4.1	Zulässige Spannungsänderungen nach VDE-AR-N 4105	18
3.4.2	Netzurückwirkungen gemäß VDE-AR-N 4105.....	19
3.4.3	Schnelle Spannungsänderungen gemäß VDE-AR-N 4105.....	19
3.4.4	Flicker gemäß VDE-AR-N 4105	20
3.4.5	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	20
3.4.6	Spannungsunsymmetrien.....	21
3.4.7	Verhalten von Erzeugungsanlagen am Netz - VDE-AR-N 4105	21
3.4.7.1	Frequenzverhalten von Erzeugungsanlagen	21
3.4.7.2	Wirkleistungsverhalten von Erzeugungsanlagen	22
3.4.7.3	Blindleistungsverhalten von Erzeugungsanlagen	23
3.5	<i>Beeinflussung der Spannungsqualität durch PV-Anlagen.....</i>	25
4	Anforderungen an die Messverfahren	29
4.1	<i>Anzuwendende Norm.....</i>	29
4.2	<i>Die EN 61000-4-30</i>	29
4.2.1	Klassen von Messverfahren nach EN 61000-4-30	29
4.2.2	Elektrische Größen	30
4.2.3	Aufrechnung von Messungen über Zeitintervalle - Klasse A.....	30
4.2.4	Aufrechnungsalgorithmus.....	30
4.2.4.1	150-Perioden-Aufrechnung - Klasse A	30
4.2.4.2	10-Minuten-Aufrechnung - Klasse A.....	31
4.2.4.3	2-Stunden-Aufrechnung - Klasse A	31
4.2.5	Unsicherheit der tatsächlichen Uhrzeit - Klasse A	31
4.2.6	Markierungskonzept.....	31
4.3	<i>Merkmale der Spannungsqualität.....</i>	32
4.3.1	Beeinflussung eines Merkmals.....	32
4.3.2	Netzfrequenz.....	32
4.3.3	Messverfahren der Klasse A	32
4.3.3.1	Messunsicherheit, Messbereich und Durchführung Klasse A	32
4.4	<i>Höhe der Versorgungsspannung.....</i>	33
4.4.1	Messverfahren - Klasse A	33
4.4.2	Messunsicherheit und Messbereich	33
4.4.3	Aufrechnung.....	33
4.5	<i>Einbrüche und Überhöhung der Versorgungsspannung.....</i>	33
4.5.1	Messverfahren - Klasse A	33
4.5.2	Erkennung eines Spannungseinbruchs	34
4.5.2.1	Auswertung eines Spannungseinbruchs	34
4.5.3	Erkennung einer Spannungsüberhöhung	34
4.5.3.1	Auswertung einer Spannungsüberhöhung	35
4.5.3.2	Messunsicherheit der Spannungsüberhöhung - Klasse A	35
4.5.3.3	Unsicherheit der Zeitdauermessung.....	35

4.5.4	Berechnung einer gleitenden Referenzspannung	35
4.6	<i>Spannungsunterbrechung</i>	36
4.6.1	Messverfahren - Klasse A	36
4.6.2	Bestimmung einer Spannungsunterbrechung	36
4.6.3	Messunsicherheit und Messbereich	37
4.7	<i>Flicker</i>	37
4.7.1	Messverfahren - Klasse A	37
4.7.2	Messunsicherheit und Messbereich	37
4.7.3	Durchführung der Messung – Klasse A	38
4.7.4	Aufrechnung - Klasse A	38
4.8	<i>Unsymmetrie der Versorgungsspannung</i>	38
4.8.1	Messverfahren - Klasse A	38
4.8.2	Messunsicherheit und Messbereich	40
4.8.3	Auswertung der Messung und Aufrechnung	40
4.9	<i>Oberschwingungsspannungen</i>	40
4.9.1	Messverfahren - Klasse A	42
4.9.2	Messunsicherheit und Messbereich	42
4.9.3	Auswertung der Messung und Aufrechnung	42
4.10	<i>Schnelle Spannungsänderungen</i>	43
4.10.1	Messverfahren - Klasse A	43
4.10.2	Messunsicherheit und Messbereich	44
4.10.3	Aufrechnung	44
5	Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Messungen	45
5.1	<i>Beschreibung und Aufbau des Mittelspannungsringes</i>	45
5.2	<i>Messgeräteauswahl</i>	47
5.3	<i>Aufbau der Messungen</i>	48
5.3.1	Messgeräteanschluss an der Niederspannung im 4-Leiter Drehstromnetz ...	48
5.3.2	Messgeräteanschluss an der Mittelspannung im 3-Leiter Drehstromnetz	49
5.3.3	Durchführung der Messungen	50
5.3.3.1	Zeitraum der Messungen	50
5.4	<i>Auswertung der Messungen</i>	50
5.4.1	Vorgehensweise	50
5.5	<i>Messung 1 - Ortsnetzstation 1</i>	51
5.5.1	Erläuterungen zu Nullströmen im Neutralleiter	53
5.6	<i>Messung 2 - Ortsnetzstation 2</i>	55
5.7	<i>Messung 3 - Ortsnetzstation 3</i>	57
5.8	<i>Messung 4 - Ortsnetzstation 4</i>	59

5.9	Messung 5 - Ortsnetzstation 5	61
5.10	Messung 6 - Ortsnetzstation 6	63
5.11	Messung 7 - Ortsnetzstation 7	65
5.12	Messung 8 - Ortsnetzstation 8	67
5.13	Messung 16 - Station 16	72
5.14	Messung 16.1 - Station 16	74
5.15	Messung 15 - Ortsnetzstation 15	76
5.16	Messung 14 - Station 14	78
5.17	Messung 14.1 - Station 14	80
5.18	Messung 13 - Ortsnetzstation 13.....	82
5.19	Messung 12 - Ortsnetzstation 12.....	84
5.20	Messung 11 - Ortsnetzstation 11.....	85
5.21	Messung 10 - Ortsnetzstation 10.....	87
5.22	Messung 9 - Ortsnetzstation 9	89
5.23	Zusammenfassung - Allgemeine Erkenntnisse.....	91
5.23.1	Spannungsänderungen.....	91
5.23.2	Frequenz.....	93
5.23.3	Spannungsunsymmetrie	93
5.23.4	Flicker	93
5.23.5	THD und Harmonische.....	93
5.23.6	Erkenntnisse	93
6	Zukünftige messtechnische Anforderungen an Transformatorstationen	95
6.1	Aufbau einer Transformatorstation.....	95
6.2	Messvarianten.....	95
6.2.1	Stationäre Power-Quality-Messungen	96
6.2.2	Mobile Power-Quality-Messungen.....	97
6.3	Mobile oder stationäre Power-Quality-Messtechnik.....	97
6.4	Festlegung der messtechnischen Anforderungen	98
6.5	Vorgehensweise und Organisation.....	99
7	Fazit und Ausblick	103
7.1	Fazit.....	103
7.2	Ausblick	104
Literatur	105

Anlagen	108
Anlagen, Teil 1	A-1
Anlagen, Teil 2	A-2
Selbstständigkeitserklärung	A-3

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 - Anteil erneuerbarer Energien in % an der Bruttostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2013	4
Abbildung 1-2 - Erzeugerleistung und Einspeisemengen von EE-Anlagen in das Netz der SWE Netz GmbH.....	4
Abbildung 2-3 - Struktur eines Elektroenergiesystems.....	9
Abbildung 2-4 - Verteilung der installierten Leistung aus EE auf die Spannungsebenen	11
Abbildung 2-5 - Wirkleistung P_{total} und Spannungen U_{eff} gemessen an einer Transformatorstation im Stadtgebiet Erfurt.....	11
Abbildung 2-6 - Definierung Versorgungsqualität nach VDE/FNN.....	13
Abbildung 3-7 - Beispiel Beeinflussung der statischen Spannungshaltung durch eine PV-Anlage am Netzverknüpfungspunkt im Bereich $\cos \varphi$ von 0,90 untererregt bis 0,90 übererregt bei konstanter Wirkleistung	24
Abbildung 3-8 - Eingabedaten und Ermittlung der Kurzschlusswerte zum Anschluss einer PV-Anlage	24
Abbildung 3-9 - Spitzenwert Erzeugung durch EE am 3. Oktober 2013	25
Abbildung 3-10 - beidseitige Verletzung des Spannungsbandes	26
Abbildung 3-11 - einseitige Verletzung oberhalb des Spannungsbandes.....	27
Abbildung 3-12 - einseitige Verletzung unterhalb des Spannungsbandes	27
Abbildung 5-13 - Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem eines im Uhrzeigersinn verlaufendes Drehspannungsversorgungsnetz	39
Abbildung 4-14 - Beispiel Amplitudenspektrum 1. bis 6. Oberschwingungsspannung...	41
Abbildung 4-15 - Beispiel Phasenspektrum 1. bis 6. Oberschwingungsspannung	41

Abbildung 4-16 - Summation von periodischen Sinusspannungen mit 50 Hz, 150 Hz und 250 Hz	42
Abbildung 4-17 - Bestimmung des Unterabweichungswertes.....	44
Abbildung 4-18 - Bestimmung des Überabweichungswertes.....	44
Abbildung 5-19 - Schematischer Aufbau Mittelspannungsring einschließlich Darstellung der Ergebnisse dreipoliger Kurzschlusswerte.....	46
Abbildung 5-20 - Übersicht PQ-Box 100	47
Abbildung 5-21 - Messaufbau in einem 4-Leiter Drehstromnetz	48
Abbildung 5-22 - Messaufbau in einem 3-Leiternetz mit Strom- und Spannungswandlern	49
Abbildung 5-23 - Beispiel Normbericht.....	50
Abbildung 5-24 - Normbericht - Messung 1	51
Abbildung 5-25 - Auswertung Tagesverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 1	52
Abbildung 5-26 - Auswertung Tagesverlauf von Wirk- und Blindleistung P_{total} und Q_{total} - Messung 1	52
Abbildung 5-27 - Einphasiger Diodengleichrichter in Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung.....	53
Abbildung 5-28 - Eingangsspannung und Eingangsstrom eines Schaltnetztes mit kapazitiver Glättung	54
Abbildung 5-29 - Dreiphasensystem mit Grundschiwingungen, 3. Harmonischen und Nullsystem der 3. Harmonischen	54
Abbildung 5-30 - Normbericht - Messung 2.....	55
Abbildung 5-31 - Auswertung Tagesverlauf von Spannung und Wirkleistung in Leiter 1 - Messung 2	56

Abbildung 5-32 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 2.....	56
Abbildung 5-33 - Normbericht - Messung 3.....	57
Abbildung 5-34 - Auswertung Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3. und 9. Harmonische Nullströme - Messung 3	58
Abbildung 5-35 - Normbericht - Messung 4.....	59
Abbildung 5-36 - Auswertung Wochenverlauf Leiterströme von L1, L2, L3 und Neutralleiterstrom - Messung 4	60
Abbildung 5-37 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 4.....	60
Abbildung 5-38 - Normbericht - Messung 5.....	61
Abbildung 5-39 - Auswertung Wochenverlauf Leiterströme von L1, L2, L3 und Neutralleiterstrom - Messung 5	62
Abbildung 5-40 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie die 3. und 27. Harmonischen Nullströme - Messung 5.....	62
Abbildung 5-41 - Normbericht - Messung 6.....	63
Abbildung 5-42 - Auswertung Tagesverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} am Dienstag 6. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr - Messung 6	64
Abbildung 5-43 - Auswertung Tagesverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} am Sonntag 11. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr - Messung 6.....	64
Abbildung 5-44 - Normbericht - Messung 7.....	65
Abbildung 5-45 - Auswertung Tagesverlauf am Montag 5. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr Gesamtnullstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3., 9. und 15. Harmonischen Nullströme - Messung 7	66

Abbildung 5-46 - Auswertung Tagesverlauf am Sonntag 11. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr Gesamtnullstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3., 9. und 15. Harmonischen Ströme- Messung 7	66
Abbildung 5-47 - Normbericht - Messung 8	67
Abbildung 5-48 - Spektrum 2. bis 50. Harmonische Spannungen - Messung 8	67
Abbildung 5-49 - Netzersatzschaltbild Versorgungsstruktur	68
Abbildung 5-50 - Ersatzschaltbild im Mitsystem des Versorgungsnetzes	69
Abbildung 5-51 - Verlauf der Impedanz mit zuvor dargestellter Netzstruktur	69
Abbildung 5-52 - Auswertung Wochenverlauf 21. Harmonische Spannung von Leiter L1, L2 und L3 - Messung 8	70
Abbildung 5-53 - Auswertung Wochenverlauf 27. Harmonische Spannungen von Leiter L1, L2 und L3 – Messung 8	71
Abbildung 5-54 - Auswertung Wochenverlauf 33. Harmonische Spannungen von Leiter L1, L2 und L3 - Messung 8	71
Abbildung 5-55 - Normbericht - Messung 16	72
Abbildung 5-56 - Auswertung der Wirkleistung P_{total} - Messung 16	73
Abbildung 5-57 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung und 3. Harmonischer Nullstrom - Messung 16	73
Abbildung 5-58 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} - Messung 16.1	74
Abbildung 5-59 - Normbericht - Messung 16.1	74
Abbildung 5-60 - Auswertung Wochenverlauf der Leiter-Leiter-Spannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} - Messung 16.1	75
Abbildung 5-61 - Auswertung Wochenverlauf der Leiter-Erde-Spannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} - Messung 16	75
Abbildung 5-62 - Normbericht - Messung 15	76

Abbildung 5-63 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} - Messung 15.....	77
Abbildung 5-64 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 15.....	77
Abbildung 5-65 - Normbericht - Messung 14.....	78
Abbildung 5-66 - Auswertung Wochenverlauf Kurzzeitflicker P_{st} von Leiter L1, L2 und L3 - Messung 14.....	79
Abbildung 5-67 - 6-Puls-Gleichrichter ohne Drossel für Kleinantriebe.....	79
Abbildung 5-68 - Auswertung Wochenverlauf. der 5. und 7 ; 11 und 13. Harmonischen Ströme in Leiter L1, - Messung 15.....	80
Abbildung 5-69 - Normbericht - Messung 14.1.....	80
Abbildung 5-70 - Auswertung Wochenverlauf der Wirkleistung P_{total} und Blindleistung Q_{total} - Messung 14.1.....	81
Abbildung 5-71 - Auswertung Wochenverlauf Leistungsfaktor $\cos \phi$ - Messung 14.1.	81
Abbildung 5-72 - Normbericht - Messung 13.....	82
Abbildung 5-73 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistung P_{total} und Nullstrom der 3. Harmonischen - Messung 13.....	83
Abbildung 5-74 - Auswertung Wochenverlauf 5. Harmonische Strom Leiter 1 und Wirkleistung von Leiter 1 - Messung 13.....	83
Abbildung 5-75 - Normbericht - Messung 12.....	84
Abbildung 5-76 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistung P_{total} und Nullstrom der 3. Harmonischen - Messung 12.....	85
Abbildung 5-77 - Normbericht - Messung 11.....	86
Abbildung 5-78 - Auswertung Wochenverlauf Leiterströme L1, L2, L3 und Neutralleiterstrom - Messung 11.....	86

Abbildung 5-79 - Normbericht - Messung 10.....	87
Abbildung 5-80 - Auswertung Wochenverlauf Strom Leiter 3 und Strom der 5. und 7. Harmonischen in Leiter 3 - Messung 10.....	88
Abbildung 5-81 - Auswertung Wochenverlauf Leistungsfaktor $\cos \phi$ - Messung 10....	88
Abbildung 5-82 - Normbericht - Messung 9.....	89
Abbildung 5-83 - Auswertung Wochenverlauf aller Leiterströme und Neutralleiterstrom Messung 9	90
Abbildung 5-84 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung und 3. Harmonischen Nullstrom - Messung 9	90
Abbildung 5-85 - Auswertung Wochenverlauf Leistungsfaktor $\cos \phi$ - Messung 9.....	91
Abbildung 5-86 - Auswertung Wochenverlauf Leiterspannungen L1, L2 und L3 - Messung 1	92
Abbildung 5-87 - Auswertung Wochenverlauf Leiterspannungen L1, L2 und L3 - Messung 16	92
Abbildung 6-88 - vereinfachtes Übersichtsschaltbild Transformatorstation.....	95
Abbildung 6-89 - PQ-Messungen an der Niederspannung	96
Abbildung 6-90 - Schema - PQ-Messung und Universalmessgerät.....	99
Abbildung 6-91 - Organigramm Power-Quality-Messungen	101
Abbildung A-1-92 - Eingabedaten Mittelspannungsring.....	1
Abbildung A-2-93 - Messgrößen und Funktionen der PQ-Box 100 expert.....	2

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 - Werte übernommen aus EN 50160 Oberschwingungsspannung in % bezogen auf die Grundschwingungsspannung U_1	17
Tabelle 3-2 - zulässige Oberschwingungsströme bezogen auf die Netzkurzschluss- leistung S_{KV}	21
Tabelle 5-3 - Symmetrische Komponenten-Einordnung von Oberschwingungen	53
Tabelle 6-4 - Mindestanforderung Universalmessgerät - Netzmonitoring	99

Abkürzungsverzeichnis

AC	alternating current – Wechselstrom
AR-N	Anwendungsregel-Niederspannung
cos phi	Leistungsfaktor Grundschiwingung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d	Dämpfung des elektrischen Versorgungsnetzes
DC	direct current – Gleichstrom
DIN	Deutsches Institut Normung
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EN	Europäische Norm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
i.d.R.	in der Regel
IEC	International Electrotechnical Commission
I _{L1}	Leiterstrom Leiter 1
I _{L2}	Leiterstrom Leiter 2
I _{L3}	Leiterstrom Leiter 3
I _N	Neutralleiterstrom
I _k “	dreipoliger Anfangskurzschlusswechselstrom
KG	Kommanditgesellschaft
kVA	kilo Volt Ampere
kW	kilo Watt
kWp	kilo Watt peak
min	Minute
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
NVP	Netzverknüpfungspunkt
OS	Oberschwingung
PC	Personal Computer
phik“	Kurzschlusswinkel
P _{lt}	Langzeitflicker
P _{total}	Summen-Wirkleistung
Q _{total}	Summen-Blindleistung
P _{st}	Kurzzeitflicker

PQ	Power Quality
PV	Photovoltaik
R	Resistanz
X	Reaktanz
S_k	dreipolige Anfangskurzschlusswechselstromleistung
THD	Total-Harmonic-Distortion
Trafo	Transformator
U_B	Betriebsspannung
U_{din}	ein von der vereinbarten Versorgungsspannung mit Hilfe des Messwandlerübersetzungsverhältnisses abgeleiteter Wert
U_{eff}	Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung
U_{L-L}	Außenleiterspannung Leiter-Leiter
U_{L1}	Leiter-Erde-Spannung Leiter 1
U_{L2}	Leiter-Erde-Spannung Leiter 2
U_{L3}	Leiter-Erde-Spannung Leiter 3
U_p	Primärnennspannung eines Transformators
U_{rms}	root-mean-square - englische Bezeichnung für quadratischen Mittelwert der elektrischen Spannung
U_s	Sekundärnennspannung eines Transformators
USB	Universal Serial Bus
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
Z_{res}	resultierende Impedanz

Formelverzeichnis

Formel 3-1 - Berechnung Langzeitflicker	15
Formel 3-2 - Berechnung der Spannungsunsymmetrie mit Leiter-Leiter-Spannungen	16
Formel 3-3 - Symmetrisches Dreiphasenspannungssystem	16
Formel 3-4 - Unsymmetrisches Dreiphasenspannungssystem	16
Formel 3-5 - Berechnung Gesamtoberschwingungsgehalt (THD)	17
Formel 3-6 - Spannungsänderung bei Bezug induktiver Blindleistung	18
Formel 3-7 - Spannungsänderung bei Bezug kapazitiver Blindleistung.....	19
Formel 3-8 - Schnelle Spannungsänderung.....	19
Formel 3-9 - zulässiger Oberschwingungsstrom am Verknüpfungspunkt.....	20
Formel 3-10 - Summe der maximal zulässigen Anschlussleistung von einphasigen Erzeugungsanlagen.....	21
Formel 4-11 - Berechnung des Aufrechnungssignals nach EN 61000-4-30	30
Formel 4-12 - Bestimmung der gemessenen Frequenz	32
Formel 4-13 - Berechnung des Effektivwertes einer sinusförmigen Wechselspannung.	33
Formel 4-14 - Berechnung der gleitenden Referenzspannung.....	35
Formel 4-15 - Berechnung der Gegensystemkomponente als Prozentwert	39
Formel 4-16 - Berechnung der Nullsystemkomponente als Prozentwert.....	39
Formel 4-17 - Berechnung der Gegensystemkomponente bei ausschließlicher Betrachtung der Leiter-Leiter-Spannungen als Prozentwert.....	40
Formel 5-18 - Berechnung der Resonanzfrequenz mit S_r , U_k und Q_c	69
Formel 5-19 - Bestimmung der resultierenden Impedanz	70

Formel 5-20 - Formel für die Dämpfung d eines Parallelschwingkreises.....	70
---	----

0 Übersicht

In der Übersicht erfolgt eine Kurzbeschreibung zur Motivation und Zielsetzung sowie zu den einzelnen Kapiteln der Diplomarbeit.

0.1 Motivation

Die elektrische Energieversorgung und -verteilung in Deutschland befindet sich seit mehr als 20 Jahren in einem technischen Wandel.

Der Anteil von großen zentralen Kraftwerksanlagen ist in dem letzten Jahrzehnt drastisch gesunken. Auch in den nächsten Jahren wird sich dieser Trend durch die sukzessive Abschaltung aller Kernkraftwerke fortsetzen. Zur Kompensation des - derzeit immer noch steigenden - Energiebedarfes wurden und werden dezentral eine Vielzahl kleinere Energieerzeugungsanlagen, vorrangig auf Basis Erneuerbarer Energien (EE), errichtet. Bei gleichzeitiger weiterer Zunahme von leistungselektronischen Bauelementen in den Verbraucher- und Erzeugungsanlagen ist zu erwarten, dass die Anforderungen zur Überwachung der Spannungsqualität deutlich ansteigen.

Beide Komponenten, die veränderte Energieerzeugung und das Verhalten der elektrischen Verbraucher stellen die Sicherung der Power Quality (Energiequalität) insbesondere in der Niederspannung in den öffentlichen Netzen vor neue Herausforderungen.

0.2 Zielsetzung

Die Diplomarbeit befasst sich mit den notwendigen Messanforderungen, der Untersuchung und Auswertung von 18 Power Quality (PQ) Messungen an 16 Transformatorstationen an einem ausgewählten Mittelspannungsring der SWE Netz GmbH.

Der Mittelspannungsring und deren Transformatorenstationen wurden auf Basis der für die Stadt Erfurt typischen Versorgungsstrukturen und deren charakteristischen Erzeuger- und Verbraucherverhalten ausgewählt.

Mit der Untersuchung und Auswertung der Messergebnisse sollen Notwendigkeit, zukünftiger Anforderungen und Schlussfolgerungen für die SWE Netz GmbH als Netzbetreiber beschrieben werden.

0.3 Kapitelübersicht

Die Diplomarbeit besteht aus sieben Kapiteln.

Nach einer Einleitung und der Vorstellung der SWE Netz GmbH erfolgen im Kapitel 2 die Beschreibung von elektrischen Versorgungsnetzen und die derzeitige Versorgungssituation.

Im Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung der theoretischen Grundlagen der Spannungsqualität (Power Quality) sowie deren grundsätzlichen Normen und gesetzliche Merkmale die im Zusammenhang der Spannungsqualität gesehen werden müssen.

Im Kapitel 4 werden, in Anlehnung an die Normen der Spannungsqualität die Anforderungen an die Messverfahren, die für die Interpretation und Bewertung der durchgeführten Messungen notwendig sind, erläutert.

Im Kapitel 5 erfolgt eine Beschreibung des Mittelspannungsringes und die Untersuchung und Auswertung der Messergebnisse mittels mobiler Messgerätetechnik.

Mit den im Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnissen werden im Kapitel 6 messtechnische Anforderungen an Transformatorstationen, die zukünftig für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung notwendig sind, beschrieben.

Im abschließenden Kapitel 7 erfolgt eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und ein Ausblick, welche Herausforderungen für Netzbetreiber zukünftig bestehen.

1 Einleitung

Der Anteil aus erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland betrug im Jahr 1990 3,6 Prozent.¹

Mit dem Inkrafttreten des Stromeinspeisungsgesetzes (StrEG) am 1. Januar 1991 wurde die Grundlage für den Ausbau zur Nutzung von erneuerbaren Energien geschaffen.

Das Gesetz bestand aus lediglich fünf Paragraphen. Wesentliche Bestandteile dieses Gesetzes waren, dass Betreiber von Stromversorgungsnetzen verpflichtet wurden, den Strom aus erneuerbaren Energien abzunehmen und zu vergüten. Weiterhin sollten Betreiber von Stromversorgungsnetzen im Rahmen einer Selbstverpflichtung zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieanteils aus erneuerbaren Energien treffen.

Am 1. April 2000 trat das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Kraft und löste das StrEG ab. Seit dem wurde das EEG mehrfach überarbeitet. Aktuell gilt das EEG mit Stand vom 01. August 2014.²

Ein wichtiger Grundsatz dieses Gesetzes war und ist die Förderungsbedingungen aller Sparten von erneuerbaren Energien zu verbessern. Um Anreize für Investoren zu schaffen ist eine 20-jährige Vergütung für jede Erzeugungsanlage ab dem ersten Tag der Inbetriebnahme im EEG verankert. Dies schafft vor allem Planungs- und Investitionssicherheit hinsichtlich der Refinanzierung und Entwicklung neuer EE-Anlagen.

Die Errichter und Betreiber von EE-Anlagen haben Anspruch auf einen unverzüglichen Anschluss ihrer Anlagen und einer vorrangigen Abnahme, Übertragung und Verteilung des zur Einspeisung angebotenen regenerativen Stroms. Weiter ist im aktuell gültigen EEG festgelegt, dass Betreiber von Stromversorgungsnetzen ihre Netze zum Anschluss regenerativen Erzeugungsanlagen optimieren oder gegebenenfalls ausbauen müssen.

Das StrEG, das EEG und letztendlich die Entscheidung zum Ausstieg aus der Atomenergie haben dafür gesorgt, ein nachhaltiges Energieversorgungskonzept in Deutschland auf Basis von erneuerbaren Energien, weg von den begrenzt vorhandenen Energieträgern wie Kohle, Öl, Uran und Erdgas voran zu treiben und aufzubauen. Zudem soll mit dem EEG als Grundlage, die CO₂-Emissionen und damit der Einfluss auf den globalen Klimawandel reduziert werden. Um langfristig bezahlbare Energie in Deutschland zu gewährleisten müssen zukünftig die erneuerbaren Energien das Primat einer stabilen und zuverlässigen Energieversorgung in Deutschland stellen.³

¹ Vgl. ([4], 2014)

² Vgl. ([2], 2014)

³ Vgl. ([3], 2014)

Die nachfolgende Abbildung 1-1 zeigt, dass der Anteil der Erneuerbarer Energien seit dem Jahr 1990 stetig gewachsen ist und sich in dem Zeitraum von 2003 bis 2013 von 7,5 % auf 23,4 % erhöht und damit sich mehr als verdreifacht hat.

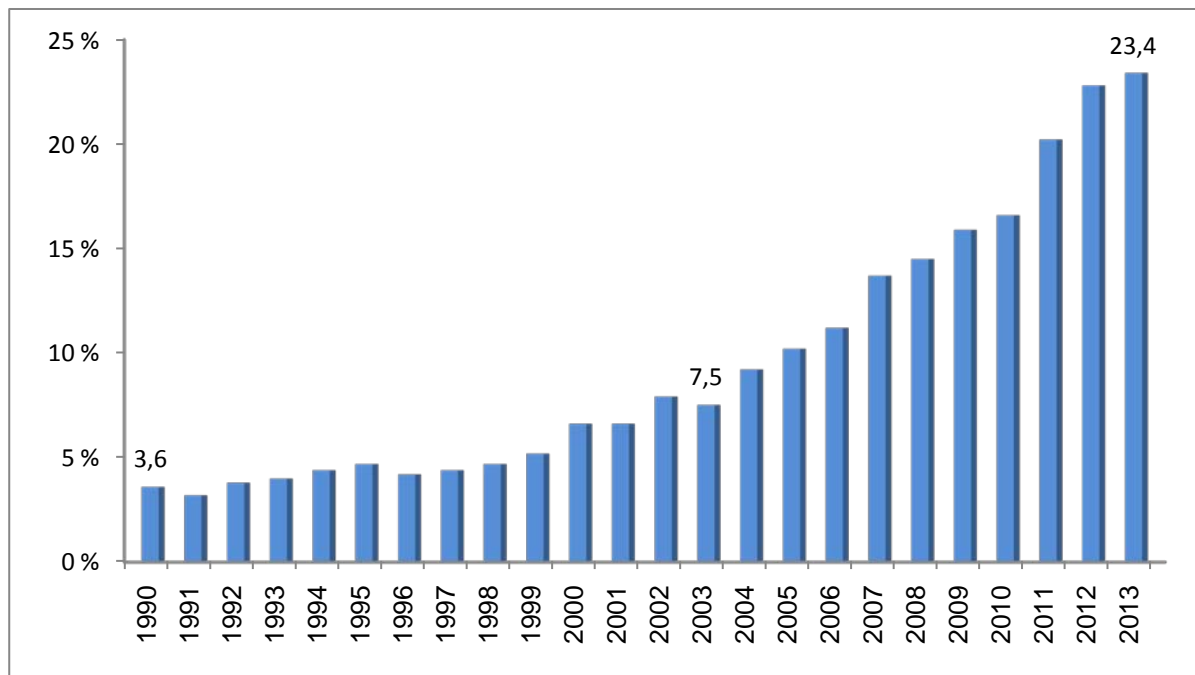


Abbildung 1-1 - Anteil erneuerbarer Energien in % an der Bruttostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2013⁴

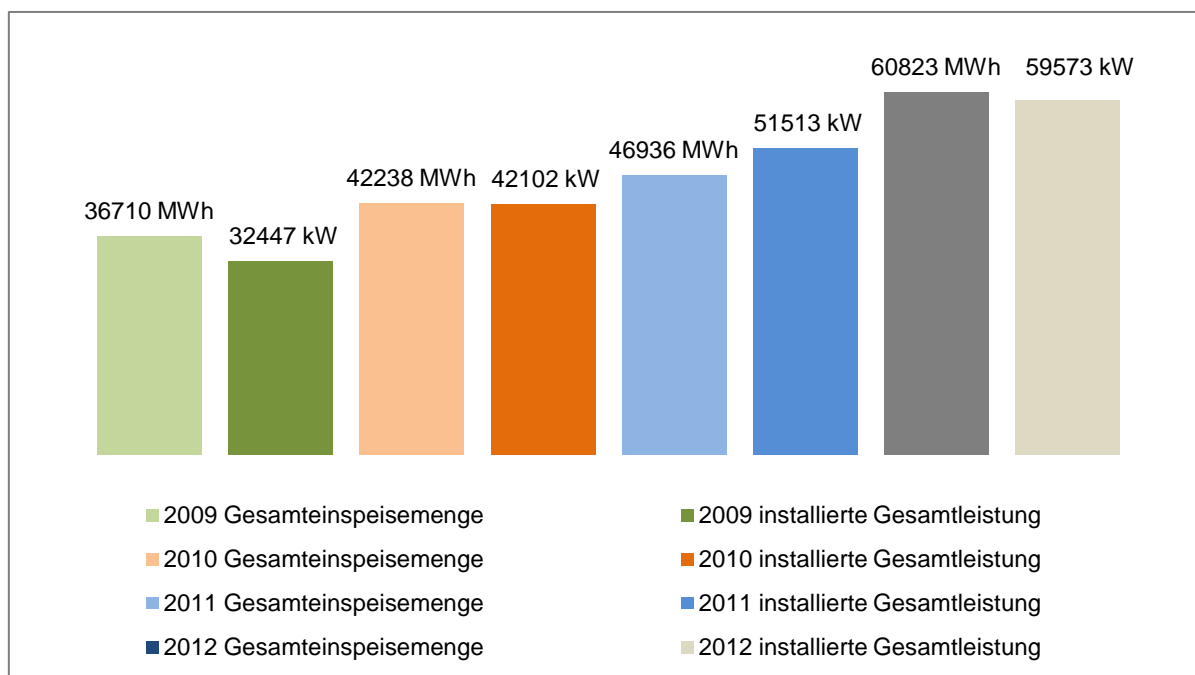


Abbildung 1-2 - Erzeugerleistung und Einspeisemengen von EE-Anlagen in das Netz der SWE Netz GmbH⁵

⁴ Vgl. ([4], 2014)

⁵ Vgl. ([5], 2014)

1.1 Die SWE Netz GmbH

Die SWE Netz GmbH (Stadtwerke Erfurt Netz GmbH) ist eine Tochtergesellschaft der Stadtwerke Erfurt Gruppe. Mehrheitlicher Gesellschafter der SWE Netz GmbH ist die Stadtwerke Erfurt GmbH dessen 100%iger Gesellschafter die Stadt Erfurt ist.⁶ Sie ist für den Bau und Betrieb des Gas- und Stromnetzes der Stadt Erfurt verantwortlich.

Die Sparte Strom der SWE Netz GmbH betreibt ein Hochspannungsnetz mit einer Betriebsspannung U_B 110kV, ein Mittel- und Niederspannungsnetz mit den Betriebsspannungen U_B 10 kV bzw. 0,4/0,23 kV.

Die wesentlichen Kenndaten des Versorgungsnetzes sind:

- 7 Umspannwerke (110/10kV)
- 30,7 km Hochspannungsnetz (110 kV)
- 980 km Mittelspannungsnetz (10 kV)
- 2019 km Niederspannungsnetz (0,4 kV)
- 976 Transformatorstationen (10/0,4 kV)
- 32141 Niederspannungshausanschlüsse
- 4000 Niederspannungskabelverteiler
- 876 Stromerzeugungsanlagen im Mittel- und Niederspannungsnetz

mit etwa 131.000 Verrechnungsmesseinrichtungen.

Die Spitzenlast lag im Jahr 2013 bei 149,6 MW die Minimallast bei 55,7 MW.⁷

Aus der Abbildung 1-2 ist zu erkennen, dass sich die installierte Gesamtleistung von EE-Anlagen im Jahr 2012 um 8060 kW auf insgesamt 59573 kW erhöht hat.

Von den im Jahre 2012 in Betrieb genommenen 203 Stück EE-Anlagen wurden 3870 kW, an das Niederspannungsnetz der SWE Netz GmbH angeschlossen. Damit erhöhte sich der Anteil der in Niederspannung angeschlossenen Erzeugungsanlagen zum Dezember 2012 auf insgesamt 15,6 Prozent und die Gesamtanlagenanzahl auf 879.⁸

Diese Zahlen verdeutlichen zum einen, dass das Niederspannungsnetz nicht mehr vorrangig eine Ebene zum Verbrauch der erzeugten Energie ist. Der zunehmende Einfluss durch EE-Anlagen der SWE Netz GmbH, lässt Anforderungen hinsichtlich der Spannungsqualität in dieser Netzebene steigen und erfordert eine technische höhere Ausstattungsnormative hinsichtlich der Überwachung und Auswertung seiner Netzparameter.

⁶ Vgl. ([6], 2014)

⁷ Vgl. ([7], 2014)

⁸ Vgl. ([8], 2014)

2 Das elektrische Versorgungsnetz

In dem folgenden Abschnitt werden die Bedeutung, der grundlegende Aufbau, die Funktion des elektrischen Versorgungsnetzes und die momentane Netzsituation des elektrischen Versorgungsnetzes der SWE Netz GmbH erläutert.

2.1 Die Bedeutung des elektrischen Versorgungsnetzes

Dem elektrischen Versorgungsnetz in Deutschland wurde bereits 1935 eine große wirtschaftliche Bedeutung per Gesetz beigeordnet. Mit dem Erlass des Energiewirtschaftsgesetzes durch die damalige Reichsregierung wurde der Ordnungsrahmen für den Aufbau einer funktionierenden und flächendeckenden elektrischen Energieversorgung geschaffen.⁹

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit schreibt dazu auf ihrer Homepage dazu.

„Die Sicherstellung einer zuverlässigen, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Dabei werden die erneuerbaren Energien eine herausragende Rolle spielen.“¹⁰
Deutschland ist ein hochentwickelter Industriestandort mit geringen eigenen Rohstoffvorkommen.

Grundlegende Voraussetzung für die Produktion und damit für den hohen Lebensstandard ist die ubiquitäre, hochzuverlässige Verfügbarkeit von elektrischer Energie. Aufgrund der immer mehr zunehmenden dezentralen Energieversorgung, dem weiter wachsenden Energiebedarf und der Vernetzung durch Informationssysteme ist dem elektrischen Versorgungsnetz in Deutschland als Garant eines weiteren hohen Lebensstandards eine große Bedeutung beizumessen.¹¹

2.2 Der Aufbau des elektrischen Versorgungsnetzes

Das elektrische Versorgungsnetz dient der Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie von den Erzeugungseinheiten zu den Verbrauchern. Für eine möglichst verlust-

⁹ Vgl. ([9], S. 831)

¹⁰ Vgl. ([16], 2014)

¹¹ Vgl. ([10] (S. 18)

arme Energieübertragung werden in Deutschland verschiedene Spannungsebenen genutzt.

In Deutschland und länderübergreifend für das europäische Verbundnetz, werden für die Übertragung großer Leistungen bzw. für weit voneinander entfernte Erzeuger -und Verbraucherschwerpunkte Transportnetze überwiegend mit den Höchstspannungsebenen 380 kV und 220 kV genutzt. Mit dem Anschluss und Betrieb von Großkraftwerken erfolgt ein, mittlerweile stark beeinflusst durch die unterlagerten Übertragungsnetze, Erzeugungs- und lastabhängiger bidirektionaler Energietransport.

Transportnetze werden mit wenigen Ausnahmen vermascht betrieben. Das heißt, die einzelnen Netzknoten sind mindestens zweiseitig angeschlossen. Die Netzknoten miteinander verbunden, ergeben zusammen ein vermaschtes Netz.¹² Vermaschte Netze bieten den Vorteil, dass bei Ausfall einer Leitung, der Leistungstransport von den anderen Leitungen übernommen und somit ein Versorgungsausfall verhindert wird (n-1 Prinzip). Die einzelnen Transportnetze bilden über Kuppelleitungen verbunden mit anderen Transportnetzen ein Verbundsystem. Man spricht vom Verbundbetrieb, was den Vorteil bietet, große Kraftwerksblöcke synchron zu betreiben.¹³

Zwischen und innerhalb der Bundesländer werden die sogenannten Übertragungsnetze für die Energieübertragung in der Hochspannungsebene 110 kV genutzt. An dieser Ebene die die untergeordneten Verteilungsnetze versorgen ist auch ein Großteil von Onshore (Binnenland) Windparks und geringfügig auch PV-Großanlagen, mit einer Leistung von 15 MW bis ca. 50 MW, angeschlossen.

Wie die Transportnetze werden auch die Übertragungsnetze meist vermascht betrieben. Strahlennetze sind in Einzelfällen für den Anschluss von Großabnehmern, wie Industriebetrieben aber auch für einzelne Erzeugungsstandorte vorhanden.

Innerhalb der Städte und zwischen Gemeinden im ländlichen Bereich, wird die aus dem Übertragungsnetz und die von Erzeugungsanlagen i.d.R. bis 15 MW, wie Blockheizkraftwerken, PV-Anlagen und Windkraftanlagen gelieferte bzw. erzeugte Energie über die Verteilungsnetze mit den Nennspannungen U_n 10 kV oder 20 kV transferiert.

Mittelspannungsnetze werden üblicherweise in Ringstrukturen aufgebaut. Die einzelnen Ringe werden mittels einer Trennstelle, offen, als Strahlennetz unter der Maßgabe geringer Leitungsverluste betrieben.

Diese Struktur bietet den Vorteil einer einfachen Betriebsführung und Überwachung. Die hierfür notwendigen Überwachungssysteme erfordern im Vergleich mit vermaschten Netzen simple und damit preiswertere Überwachungssysteme.

¹² Vgl. ([13], S. 369)

¹³ Vgl. ([14], S. 20)

Mit Bezug auf den Anschluss von Verbrauchs- und Erzeugungsanlagen ergibt sich mit zunehmender Leitungslänge der Nachteil eines erhöhten Spannungsfall oder -hub. Dies führt zu erhöhten Leitungsverlusten und nicht optimaler Ausnutzung der Übertragungskapazitäten.

Der Bezug und Verbrauch erfolgt in öffentlichen Versorgungsnetzen über die Niederspannungsebene 0,4/0,23 kV, die ihre Energie entweder aus dem vorgelagerten Mittelspannungsnetz oder im zunehmenden Maße aus den unmittelbar angeschlossenen dezentralen Erzeugungsanlagen beziehen¹⁴.

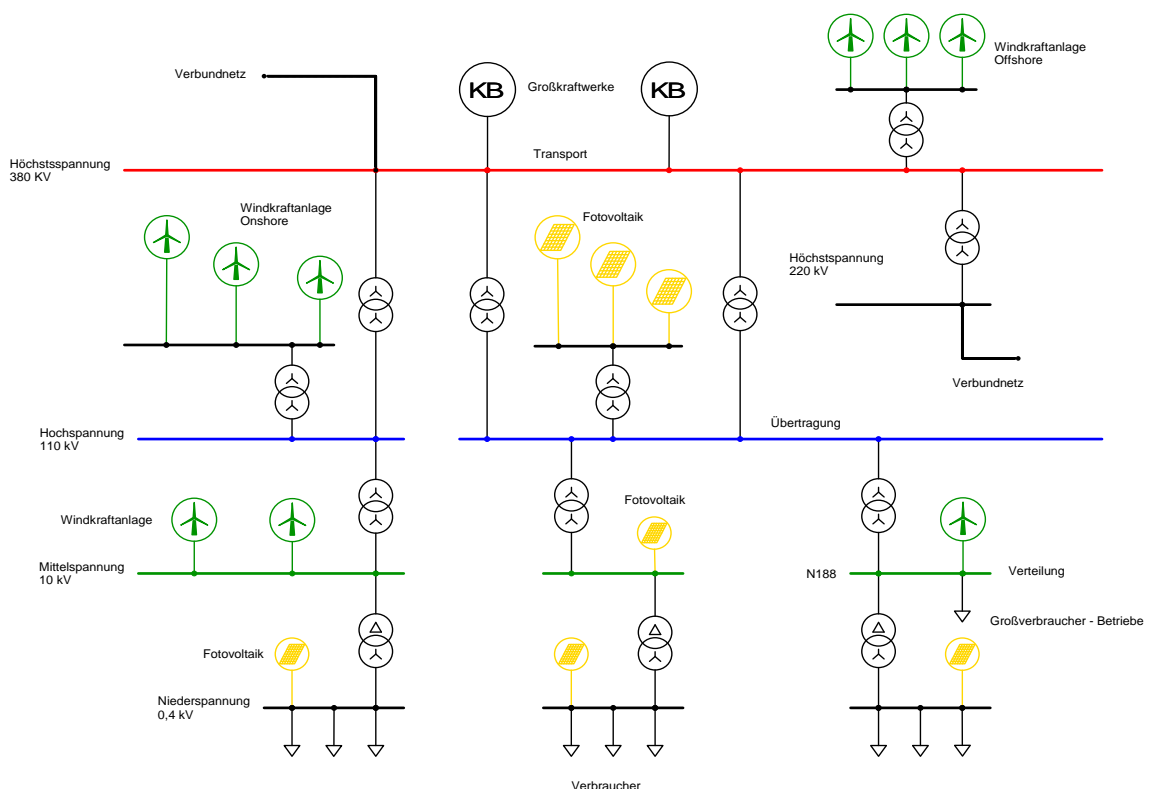


Abbildung 2-3 - Struktur eines Elektroenergiesystems¹⁵

2.3 Die Funktionsweise des elektrischen Versorgungsnetzes

Die Abbildung 2-3 zeigt ein vertikales Verbindungssystem von der Höchstspannung bis zur Niederspannung.

Die Netzebenen der Höchst-, Hoch-, und Mittelspannung sind vertikal über regelbare Transformatoren miteinander verbunden. Diese Transformatoren verfügen über ein Re-

¹⁴ Vgl. ([11], S. 18)

¹⁵ Vgl. ([12], S. 17)

gellastschaltwerk, welches den Spannungswert an den einzelnen Netzknoten in bestimmten Toleranzen - einzuhaltendes Regelband - beeinflussen kann um somit eine Über- oder Unterschreitung der zugelassenen Grenzwerte zu verhindern.

Die Netzebenen in der Mittel- und Niederspannung sind ebenfalls über Transformatoren, eingebaut in Ortsnetzstationen, verbunden. Die i.d.R. zum Einsatz kommenden Drehstromtransformatoren haben eine Nennscheinleistung von 100 bis 630 kVA. Die genannten Leistungsgrößen bis maximal 630 kVA haben sich in den öffentlichen Versorgungsnetzen unter Berücksichtigung der Ausdehnung von Niederspannungsnetzen als technisch und wirtschaftlich sinnvoll über viele Jahrzehnte bewährt.

Diese Transformatoren sind fast ausschließlich, zur Anpassung des Übersetzungsverhältnisses von der Oberspannung zur Unterspannung, mit einem auf der Oberspannungsseite manuell umschaltbaren Stufensteller ausgerüstet. Üblich sind die Stufenstellungen von plus/minus 2-mal 2,5 Prozent oder plus/minus 1-mal 4 Prozent.

Notwendig sind diese Stufensteller um den auf der Mittelspannung wirksamen unterschiedlichen Spannungswerten, die sich aufgrund der verschiedenen Anschlusspunkte der Transformatoren im Netz zwischen Leitungsanfang und Leitungsende ergeben, entgegen zu wirken und damit möglichst normkonforme Werte an der Niederspannung zu gewährleisten.

2.4 Die momentane Netzsituation

Bis zur Jahrtausendwende fand fast ausschließlich aufgrund einer zentralen Energieerzeugung ein unidirektionaler vertikaler Energiefluss statt. In diesem wurde die Energie in zentralen Großkraftwerken erzeugt und über die einzelnen Netzebenen von der Höchstspannung in die Niederspannung transferiert.

Mit dem danach deutlich steigenden Anteil der Stromerzeugung aus EE hat sich dieses Prinzip grundlegend verändert.

Ein Großteil der Erzeugungsanlagen aus EE ist in der Mittel- und Niederspannung - wie in der Abbildung 2-4 dargestellt - angeschlossen. Die Energieerzeugung erfolgt über eine Vielzahl von EE-Anlagen angeschlossen an einer fast gleich großen Anzahl von Netzanchlusspunkten. Dies hat zur Folge, dass im zunehmenden Maß ein bidirektionaler Energietransfer zwischen den Spannungsebenen Hoch-, Mittel- und Niederspannung vorzufinden ist.

Bestimmte Netzbereiche können oder müssen heute, aus Sicht der Leistungsflüsse, als Flächenkraftwerke angesehen werden. Für deren Versorgungszuverlässigkeit trägt letztendlich der zuständige Netzbetreiber die Verantwortung.

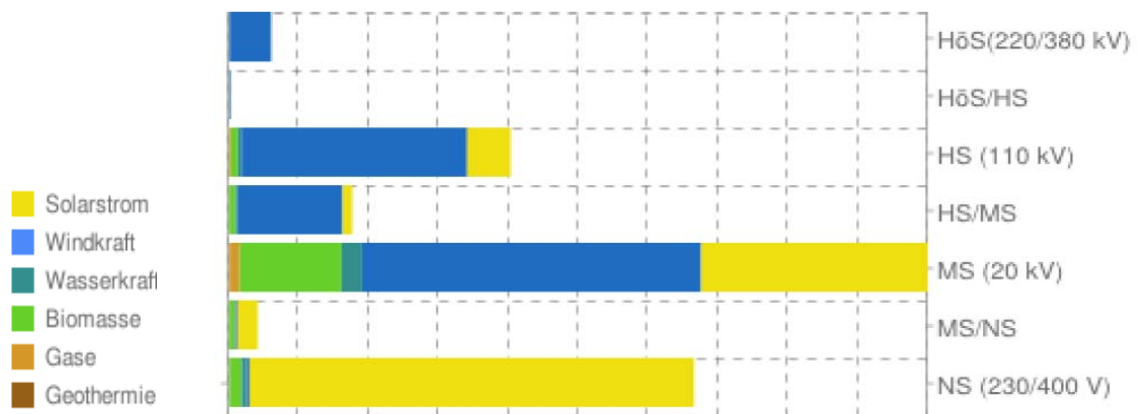


Abbildung 2-4 - Verteilung der installierten Leistung aus EE auf die Spannungsebenen¹⁶

In der Abbildung 2-4 ist zu erkennen, dass in der Niederspannung vorrangig Solarstromanlagen zur Energieerzeugung angeschlossen sind. Dies hat zur Folge, dass Solarstromanlagen, bedingt durch ihre nichtkontinuierliche Erzeugung, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, bidirektionale Leistungsflüsse verursachen und die Spannungsqualität in dieser Netzebene zunehmend beeinflussen.



Abbildung 2-5 - Wirkleistung P_{total} und Spannungen U_{eff} gemessen an einer Transformatorstation im Stadtgebiet Erfurt

Die bestehenden elektrischen Versorgungsnetze in der Mittel- und Niederspannung wurden über viele Jahrzehnte und leider teilweise bis dato für den Anschluss von Verbrauchern technisch konzipiert und mit einfachster zuverlässiger Technik ausgestattet. Dieser

¹⁶ Vgl. ([15], 2014)

einfache Standard wird für die Zukunft nicht mehr ausreichen, das haben auch die hierfür politischen Verantwortlichen in unserem Land erkannt.

Das Bundesamt für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit schreibt hierzu auf ihrer Homepage.

„Der Einstieg ins Zeitalter der Erneuerbaren kann aber nicht mit den Stromnetzen von gestern funktionieren - weder was die Länge, Kapazität und Lage der Leitungen noch ihre Technik anbetrifft.“

„Der Anteil der erneuerbarer Energien am deutschen Bruttostromverbrauch soll bis 2050 auf ca. 80 Prozent ansteigen. Dies erfordert einen radikalen Umbau der gesamten Energieinfrastruktur.“¹⁷

¹⁷ Vgl. ([16], 2014)

3 Power Quality

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der Wertigkeit von Spannungsqualität sowie deren Merkmale (Power Quality) als Teil der Versorgungsqualität anhand der in Deutschland geltenden Normen und Richtlinien.

3.1 Versorgungsqualität

Die Versorgungsqualität umfasst drei Domänen. Dies sind die Servicequalität, Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität.

Während die Servicequalität die Qualität von Geschäftsvorgängen während der gesamten Vertragslaufzeit beschreibt, die Versorgungszuverlässigkeit die Anzahl und Dauer der Versorgungsunterbrechungen kennzeichnet, definiert die Spannungsqualität die wesentlichen Merkmale der Versorgungsspannung.¹⁸ Die Merkmale der Versorgungsspannung sind gekennzeichnet durch europäische und internationale Normen.

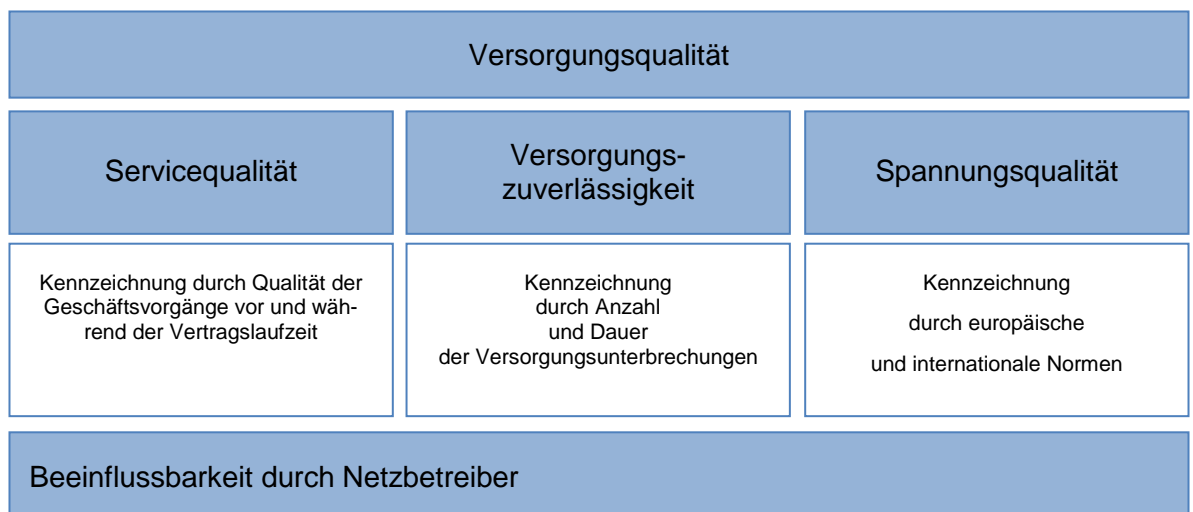


Abbildung 2-6 - Definierung Versorgungsqualität nach VDE/FNN¹⁹

¹⁸ Vgl. ([18], 2011)

¹⁹ Vgl. ([17], 2014)

3.2 Spannungsqualität

Erste Festlegungen zur Spannungsqualität entstanden im Jahre 1989. Durch die Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique (UNIPED) erfolgte die Beschreibung des Istzustandes von Nieder- und Mittelspannungsnetzen. Mit den darin gewonnenen Erkenntnissen wurde 1993 von der Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (CENELEC) eine Europäische Norm EN 50160 verabschiedet. Sie trat 1995 als Europäische Norm (EN) und parallel als Deutsche Norm (DIN-Norm) in Kraft. In den Folgejahren wurde sie mehrmals überarbeitet. Aktuell gilt die Fassung mit Stand Februar 2011.²⁰

Die in Punkt 2.4 beschriebenen veränderten Energieflüsse und durch den vermehrten Einsatz von Leistungselektronik in den Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen, gewinnt die Spannungsqualität, bei gleichzeitigen steigenden Qualitätsansprüchen der angeschlossenen Stromverbraucher, immer mehr an Bedeutung. Bedingt durch die bestehenden Netzverhältnisse, steht eine begrenzte Kurzschlussleistung an den Netzverknüpfungspunkten (NVP) zur Verfügung. Mit dem Einsatz von leistungselektronischen Komponenten in Verbrauchsanlagen, welche i.d.R. eine nichtlineare oder nicht stationäre Betriebscharakteristik aufweisen, entstehen Netzurückwirkungen. Diese Netzurückwirkungen beeinflussen die Spannungsqualität.

Die Spannungsqualität wird bestimmt, durch das vorgelagerte Netz des Netzbetreibers sowie durch die Netzurückwirkungen von Erzeugungsanlagen und Verbrauchsgeschäften, die seitens des Netzbetreibers jedoch nur sehr beschränkt durch normative oder vertragliche Festlegungen beeinflusst werden können.

3.3 Merkmale der Europäischen Norm EN 50160

Die Europäische Norm (EN) 50160 definiert, beschreibt und legt die Merkmale der Versorgungsspannung in Bezug auf Frequenz, Höhe, Kurvenform und Symmetrie der in einem Drehstromsystem verketteten Leiterspannungen fest.²¹

In ihr sind die Merkmale der Versorgungsspannung an der Übergabestelle zum Netznutzer in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungswechselstromnetzen unter normalen Betriebsbedingungen definiert.²²

Diese definierten Merkmale müssen an jeden bestimmten - vereinbarten - Netzverknüpfungspunkt (NVP) eingehalten werden.

²⁰ Vgl. ([21], S. 41)

²¹ Vgl. ([19], S. 6)

²² Vgl. ([22], S. 5)

3.3.1 Netzfrequenz

Die Grundschiwingung muss im Netzverbund, bezogen auf den 10 s Mittelwert, während 99,5 % eines Jahres im Bereich von 49,5 Hz bis 50,5 Hz (± 1 %) bzw. 100 % eines Jahres von 47,0 Hz bis 52,0 Hz (- 6 % und + 4 %) liegen.

3.3.2 Langsame Spannungsänderungen

95 % der 10 min-Mittelwerte von U_{eff} der Versorgungsspannung jedes Wochenintervalls müssen im Bereich von ± 10 % liegen. 100 % der 10 min-Mittelwerte von U_{eff} der Versorgungsspannung jedes Wochenintervalls müssen im Bereich von + 10 % und – 15 % liegen.

3.3.3 Schnelle Spannungsänderungen

In Niederspannungsnetzen beträgt die Abweichung von der Nennspannung in der Regel nicht mehr als 5 %. In Ausnahmefällen sind aber Abweichungen bis 10 % von der Nennspannung mehrmals täglich möglich.

3.3.4 Flickerstärke

Die Langzeitflickerstärke P_{lt} (lt = Long Time) darf den Wert 1, aufgrund von Spannungsänderungen, während 95 % eines beliebigen Wochenintervalls nicht überschreiten.

Die Flickerstärke wird berechnet aus einer Folge von 12 Kurzzeitflickerwerten über ein Intervall von 2 Stunden.

$$P_{lt} = 3 \sqrt{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

Formel 3-1 - Berechnung Langzeitflicker

Der Kurzzeitflicker P_{st} (st = Short Time), der in dieser Norm nicht definiert ist, wird über ein Kurzzeitintervall von 10 min gemessen.

Flicker ist die subjektive Wahrnehmung von Leuchtdichteschwankungen verursacht durch Spannungsschwankungen in Form eines Sprungs, einer Rampe oder eines quasi beliebigen Verlaufs. Der Wert wird über die relative Spannungsänderung beschrieben. Diese Spannungsschwankungen mit einer Frequenz von etwa 0,005 Hz bis 35 Hz führen je nach Amplitude zu Lichtflimmern, dass durch das menschliche Auge wahrgenommen werden kann.²³

²³ Vgl. ([24], S. 117)

3.3.5 Unsymmetrie der Versorgungsspannung

Innerhalb eines Wochenintervalls müssen 95 % der 10-min-Mittelwerte des Effektivwerts der Gegensystemkomponente im Bereich von 0 bis 2 % bezogen auf die Mitsystemkomponente liegen. $U_{\text{Gegensystem}} \leq 0,02 \times U_{\text{Mitsystem}}$

Die Spannungsunsymmetrie berechnet sich mit den Leiter-Leiter-Spannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} :²⁴

$$U_{\text{unsym}} = \sqrt{\frac{6 \cdot (U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)}{(U_{12} + U_{23} + U_{31})^2} - 2}$$

Formel 3-2 - Berechnung der Spannungsunsymmetrie mit Leiter-Leiter-Spannungen

Die Netze in der Hoch-, Mittel- und Niederspannung sind als Dreiphasensysteme aufgebaut.

Ein Dreiphasenspannungssystem ist symmetrisch, wenn alle drei Amplituden der Leiter-Erde-Spannungen U_1 , U_2 und U_3 gleich groß sind und ihre Nullphasenwinkel sich um jeweils 120 Grad unterscheiden. Für die Symmetrie eines Dreiphasensystems gilt:

$$U_{\text{sym}} = |\underline{U}_1| = |\underline{U}_2| = |\underline{U}_3| \quad \text{mit}$$

$$\underline{U}_1 = U \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_2 = U \cdot e^{j240^\circ}$$

$$\underline{U}_3 = U \cdot e^{j120^\circ}$$

Formel 3-3 - Symmetrisches Dreiphasenspannungssystem

Eine Unsymmetrie liegt dann vor, wenn mindestens eine der drei Amplituden von den anderen beiden Amplituden abweicht oder die drei Phasenwinkel sich nicht genau um 120 Grad voneinander unterscheiden.

$$U_{\text{unsym}} = |\underline{U}_1| \neq |\underline{U}_2| \neq |\underline{U}_3|$$

Formel 3-4 - Unsymmetrisches Dreiphasenspannungssystem

In Niederspannungsnetzen können Unsymmetrien durch einphasige Lasten oder Erzeugungsanlagen auftreten. Zur Vermeidung unzulässiger Unsymmetrien sind daher in den Technischen Anschlussbedingungen (TAB) der Netzbetreiber und in den Regelwerken für den Anschluss und Betrieb von Erzeugungsanlagen, Grenzwerte für den Anschluss von einphasigen Anlagen festgelegt.

²⁴ Vgl. ([40], S. 21)

3.3.6 Oberschwingungsspannung

In 95 % eines Wochenintervalls müssen die 10-min-Mittelwerte des Effektivwertes aller der in der Tabelle 3-1 aufgeführten Oberschwingungen kleiner oder gleich der genannten prozentualen Grenzwerte sein.

Der Gesamterschwingungsgehalt THD (Total-Harmonic-Distortion) wird gebildet aus den Oberschwingungen bis zur Ordnungszahl 40.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}}{U_1}$$

Formel 3-5 - Berechnung Gesamterschwingungsgehalt (THD)

Der THD darf 8 % nicht überschreiten.

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Keine vielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung h	Relative U _h	Ordnung h	Relative U _h	Ordnung h	Relative U _h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 - 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Anmerkung: Für Oberschwingungen oberhalb der 25. Ordnung werden keine Werte angegeben, da sie gewöhnlich niedrig, allerdings wegen Resonanzerscheinungen weitestgehend unvorhersehbar sind.

Tabelle 3-1 - Werte übernommen aus EN 50160 Oberschwingungsspannung in % bezogen auf die Grundschwingungsspannung²⁵

Oberschwingungen entstehen vorwiegend verursacht durch Betriebsmittel mit nicht-linearer Spannung-Strom-Charakteristik. Diese beeinflussen die Spannungsqualität der sinusförmigen (50 Hz) Netzwechselspannung im Versorgungsnetz unter Verwendung von leistungselektronischen Baugruppen.

3.4 Richtlinien für Erzeugungsanlagen

Für den Anschluss von Erzeugungsanlagen an der Niederspannung, Mittelspannung und Hochspannung gelten einzelne spezielle Richtlinien.

²⁵ Vgl. ([23], S. 14)

Die Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 beschreibt die Mindestanforderungen für den Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, die ab den 1. Januar 2012 im vollen Umfang anzuwenden ist.

Mit Bezug auf die die Einhaltung der Spannungsqualität an der Niederspannung in Transformatorstationen ist sie ein wichtiger Bestandteil, denen es zu beachten gilt. Nachstehend werden deshalb die relevanten Merkmale der Spannungsqualität, die in der Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 vom August 2011 definiert sind, erläutert.

Der Anschluss und Betrieb von Erzeugungsanlagen kann vorhandene Betriebsmittel sowie die Spannungsqualität beeinflussen. Um die Spannungsqualität aller Verbraucher- und Erzeugungsanlagen zu gewährleisten, muss der zuständige Netzbetreiber den wirtschaftlich günstigsten und technisch geeigneten Netzverknüpfungspunkt (NVP) ermitteln.

Die VDE AR-N 4105 schreibt hierzu:

„Entscheidend für die Festlegung des Netzanschlusspunktes ist stets das Verhalten der Erzeugungsanlage am Netzschlusspunkt bzw. am Verknüpfungspunkt. Damit soll sichergestellt werden, dass die Erzeugungsanlage ohne störende Rückwirkungen betrieben und die Versorgung anderer Kunden nicht beeinträchtigt wird.“²⁶

Basis für die Festlegung des Netzverknüpfungspunktes bilden die definierten Grenzwerte der VDE AR-N 4105. Diese können mit den darin beschriebenen Formeln berechnet oder mit einer dafür geeigneten Simulationssoftware bestimmt werden müssen.

Zu beachten ist, dass die Grenzwerte nach VDE-AR-N 4105 zur Anschlussbeurteilung einer Erzeugungsanlage an einem Netzverknüpfungspunkt lokale Aussagekraft besitzen. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen zum Anschluss einer Erzeugungsanlage entsprechend der DIN EN 50160 in dem zu betrachtenden Netz, wie im Abschnitt 3.5 erläutert, überprüft und beurteilt werden.

3.4.1 Zulässige Spannungsänderungen nach VDE-AR-N 4105

Die Spannungsänderung durch Erzeugungsanlagen darf im ungestörten Betrieb an keinem Verknüpfungspunkt in einem Niederspannungsnetz einen Wert von 3 % gegenüber der Spannung ohne Erzeugungsanlagen überschreiten.

$$\Delta U_a \leq 3 \%$$

Die Spannungsänderung am Verknüpfungspunkt bei Bezug induktiver Blindleistung wird durch folgende Formel berechnet:

$$\Delta U_a = \frac{S_{Amax} \cdot (R_{kV} \cdot \cos \varphi - X_{kV} \cdot \sin \varphi)}{U^2}$$

Formel 3-6 - Spannungsänderung bei Bezug induktiver Blindleistung

²⁶ Vgl. ([32], S. 18)

Die Spannungsänderung am Verknüpfungspunkt bei Bezug kapazitiver Blindleistung wird durch folgende Formel berechnet:

$$\Delta U_a = \frac{S_{Amax} \cdot (R_{kV} \cdot \cos \varphi + X_{kV} \cdot \sin \varphi)}{U^2}$$

Formel 3-7 - Spannungsänderung bei Bezug kapazitiver Blindleistung

In den Formeln 3-4 und 3-5 wird das Verbraucherzählpfeilsystem angewendet, woraus hervor geht, dass durch den Bezug induktiver oder kapazitiver Blindleistung die Spannung am Netzverknüpfungspunkt beeinflusst werden kann.²⁷

3.4.2 Netzurückwirkungen gemäß VDE-AR-N 4105

Elektrische Einrichtungen von Kundenanlagen sind so zu planen und zu bemessen, dass Rückwirkungen auf das Netz des Netzbetreibers und Anlagen anderer Kunden auf ein zulässiges Maß dauerhaft begrenzt werden. Treten dennoch Rückwirkungen auf, so hat der Anlagenbetreiber geeignete Maßnahmen zu treffen und mit dem Netzbetreiber abzustimmen. Der Netzbetreiber kann die Anlage bis zur Behebung der Mängel vom Netz trennen.²⁸

3.4.3 Schnelle Spannungsänderungen gemäß VDE-AR-N 4105

Die durch das gleichzeitige Zu- und Abschalten von Erzeugereinheiten bedingte Spannungsänderung am Netzverknüpfungspunkt führt nicht zu unzulässigen Netzurückwirkungen, wenn die maximale Spannungsänderung am Netzverknüpfungspunkt nicht mehr als 3 % beträgt. Bei einem Wert von 3 % darf dieser höchsten einmal in 10 Minuten auftreten.²⁹

Die schnelle Spannungsänderung kann über das Verhältnis des größten während eines Schaltvorganges auftretenden Stromes I_A zum Generatorbemessungsstrom I_{rE} multipliziert mit dem Verhältnis der maximalen Scheinleistung S_{Emax} zur Netzkurzschlussleistung S_{kV} nach folgender Formel berechnet werden:

$$\Delta U_{max} = k_{imax} \cdot \frac{S_{Emax}}{S_{kV}} = \frac{I_A}{I_{rE}} \cdot \frac{S_{Emax}}{S_{kV}}$$

Formel 3-8 - Schnelle Spannungsänderung

²⁷ ([26], S. 42)

²⁸ ([27], S. 43)

²⁹ ([28], S. 43)

3.4.4 Flicker gemäß VDE-AR-N 4105

Bemessungsgröße für den Flicker – Beschreibung siehe auch Punkt 3.3.4 – ist die Langzeitflickerstärke P_{lt} .

Die Gesamtheit aller Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz darf am ungünstigsten Verknüpfungspunkt die Langzeitflickerstärke von $P_{lt} = 0,5$ nicht überschreiten.³⁰

3.4.5 Oberschwingungen und Zwischenharmonische

Oberschwingungen und Zwischenharmonische die durch Erzeugungsanlagen verursacht werden, sind Bestandteil eines Konformitätsnachweises. In diesem werden die elektrischen Eigenschaften der Erzeugungseinheit ausgewiesen. Mit diesem Konformitätsnachweis wird bestätigt, dass die Erzeugereinheit die Anforderungen der Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 erfüllt.

Die Rückwirkungen durch Oberschwingungen und Zwischenharmonische gelten als ausreichend begrenzt, wenn sie den Normen DIN EN 61000-3-2 oder DIN EN 61000-3-12 „Elektromagnetische Verträglichkeit Grenzwerte für Oberschwingungsströme“ entsprechen.

Wenn die Grenzwerte der DIN EN 61000-3-2 oder DIN EN 61000-3-12 nicht eingehalten werden, kann der maximal zulässige Oberschwingungsstrom $I_{v\text{ zul}}$ einer Erzeugungseinheit aus den bezogenen Oberschwingungsströmen $i_{v\text{ zul}}$ in Tabelle 3-2 multipliziert mit der Netzkurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt mit folgender Formel bestimmt werden.³¹

$$I_{v\text{ zul}} = i_{v\text{ zul}} \cdot S_{kV}$$

Formel 3-9 - zulässiger Oberschwingungsstrom am Verknüpfungspunkt

Ordnungszahl v, μ	Zulässiger, bezogener Oberschwingungsstrom $i_{v, \mu \text{ zul}}$ in A/MVA
3	3
5	1,5
7	1
9	0,7
11	0,5
13	0,4
17	0,3
19	0,25
23	0,2
25	0,15
$25 < v < 40^a$	$0,15 \cdot 25/v$

³⁰ ([29], S. 44)

³¹ ([30], S. 44)

geradzahlige	1,5/v
$\mu < 40$	1,5/v
$42 < \mu, \nu < 178^b$	4,5/v
^a Ungeradzahlige. ^b Ganzzahlig und nicht ganzzahlig innerhalb einer Bandbreite von 200 Hz mit der Mit- tenfrequenz ν . Messung nach DIN EN 61000-4-7 (0847-4-7).	

Tabelle 3-2 - zulässige Oberschwingungsströme bezogen auf die Netzkurzschlussleistung S_{kv} ³²

3.4.6 Spannungsunsymmetrien

Um die Parameter der Spannungsunsymmetrie einzuhalten, ist bei dem Anschluss von Erzeugungsanlagen eine gleichmäßige Leistungsverteilung auf die drei Außenleiter L1, L2 und L3 anzustreben. Der Anschluss von Erzeugungsanlagen ist einphasig je Netzanschluss bis zu einer Leistung von 4,6 kVA zulässig, wobei eine Leistungsdifferenz von maximal 4,6 kVA nicht überschritten werden darf. Maximal können $3 \times 4,6 \text{ kVA} = 13,8 \text{ kVA}$ einphasig, verteilt auf die drei Außenleiter, angeschlossen werden.

$$\sum S_{Emax} \leq 4,6 \text{ kVA je Außenleiter}$$

Formel 3-10 - Summe der maximal zulässigen Anschlussleistung von einphasigen Erzeugungsanlagen³³

Erzeugerleistungen darüber hinaus sind dreiphasig im Drehstromsystem anzuschließen. Diese Anforderung gilt auch dann als erfüllt, wenn einphasig angeschlossene Erzeugereinheiten kommunikativ miteinander verbunden werden und damit wie symmetrische Drehstrom-Erzeugereinheiten wirken.

3.4.7 Verhalten von Erzeugungsanlagen am Netz - VDE-AR-N 4105

Im Punkt 5.7 wurde in Bezug vorangegangene Regelwerke, die Merkmale für das Verhalten der Erzeugungsanlagen am öffentlichen Netz bei abweichenden Netzverhältnissen neu definiert.

3.4.7.1 Frequenzverhalten von Erzeugungsanlagen

Erzeugungsanlagen müssen in Folge von Frequenzabweichungen im Bereich von 50,2 Hz bis 51,5 Hz ihr Leistungsverhalten anpassen können und dürfen sich im Bereich von 47,5 Hz bis 51,5 Hz nicht mehr automatisch vom Netz trennen.

Diese Festlegung war in Bezug auf die Gesamtsystemstabilität des Verbundnetzes zwingend notwendig, da mit dem vorangegangenen Regelwerk eine flächendecken-

³² Vgl. ([30], S. 44)

³³ Vgl. ([25], S. 25)

de gleichzeitige Abschaltung vieler PV-Anlagen unterhalb von 49,8 Hz und oberhalb von 50,2 Hz erfolgt wäre. Die Beibehaltung dieser Regel hätte die Gesamtsystemstabilität des Verbundnetzes, dies haben verschiedene Untersuchungen belegt, stark gefährden können.

3.4.7.2 Wirkleistungsverhalten von Erzeugungsanlagen

PV-Anlagen größer 30 kWp müssen sich aktiv am Erzeugungsmanagement bzw. Netzsicherheitsmanagement beteiligen. Im EEG 2012 Paragraph 6 wird eine fernsteuerbare Wirkleistungsreduzierung ab dieser Leistung verlangt.

PV-Anlagen mit einer Leistung kleiner 30 kWp müssen diese Forderung nicht zwingend erfüllen. Wenn eine fernwirksteuerbare Leistungsreduzierung nicht möglich ist, muss allerdings die installierte Leistung permanent auf 70 % der installierten Leistung reduziert werden.

Die Forderung der fernsteuerbaren Leistungsreduzierung gilt nach dem EEG 2012 Paragraph 6 auch für KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung) mit einer Anlagenleistung größer 100 kW.

Die VDE-AR-N 4105 fordert für alle Erzeugungsanlagen größer 100 kW eine fernwirktechnischen Leistungsreduzierung, spezifiziert allerdings hinsichtlich der Wirkleistungsreduzierung keine kleineren Leistungsgrößen.

In der Praxis haben sich, die durch den zuständigen Netzbetreiber vorzugebenden Leistungsstufen, 100/60/30/0 % bewährt. Diese Leistungsstufen beziehen sich auf die installierte Leistung und nicht auf die momentane Isteinspeisung.

Diese technische Anforderungen waren überfällig bzw. zwingend notwendig, um bei lokalen Netzüberlastungen oder bei einem im Verbundnetz zu erwartenden Leistungsüberschuss, Einfluss auf den hohen Anteil von Erzeugungsanlagen im Leistungsbereich größer 30 kWp bis 100 kWp nehmen zu können.

3.4.7.3 Blindleistungsverhalten von Erzeugungsanlagen

Um Erzeugungsanlagen aktiv an der lokalen statischen Spannungshaltung des Versorgungsnetzes zu beteiligen, müssen sie unabhängig von der Anzahl der speisenden Phasen unter normalen Betriebsbedingungen, ab einer Wirkleistungsabgabe größer 20 % der Bemessungsleistung in der Lage sein, Blindleistung zu kompensieren.

In der Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 sind hierzu folgende Parameter festgelegt:

- Erzeugungsanlage $\sum S_{E_{\max}} \leq 3,68 \text{ kVA}$:
 $\cos \varphi$ von 0,95 untererregt bis 0,95 übererregt nach DIN 50438
- Erzeugungsanlage $3,68 \text{ kVA} < \sum S_{E_{\max}} \leq 13,8 \text{ kVA}$:
Kennlinienvorgabe des Netzbetreibers innerhalb $\cos \varphi$ von 0,95 untererregt bis 0,95 übererregt
- Erzeugungsanlage $\sum S_{E_{\max}} > 13,8 \text{ kVA}$:
Kennlinienvorgabe des Netzbetreibers innerhalb $\cos \varphi$ von 0,90 untererregt bis 0,90 übererregt

Der Netzbetreiber kann innerhalb der zulässigen Grenzen einen festen $\cos \phi$ Wert vorgeben. Bei Veränderung der Wirkleistung muss sich die Blindleistung entsprechend automatisch anpassen.

Alternativ kann ein von der Wirkleistung abhängiger flexibler Verschiebungsfaktor $\cos \phi$ vorgegeben werden.³⁴

Durch die Möglichkeit der induktiven und kapazitiven Blindleistungsfahrweise – siehe Abbildung 3-7 - kann in Abhängigkeit von der Impedanz des vorgelagerten Netzes die Höhe der statischen Spannungshaltung und damit die Spannungsqualität am Verknüpfungspunkt beeinflusst werden.

Die berechneten Werte wurden mit den Formeln 3-6 und 3-7 - siehe Seite 18 und 19 - an einem realen Anlagenbeispiel einer PV-Anlage, welches sich in dem untersuchenden Mittelspannungsring befindet, ermittelt. Die AC-Wirkleistung wurde mit 309,4 kW als konstant angenommen.

Die Berechnung der minimalen Kurzschlusswerte nach VDE 0102/2002 - siehe Abbildung 3-8 - erfolgte mit der Planungs- und Simulationssoftware PSS SINCAL Version 10.5, von der Firma Siemens. Als Verknüpfungspunkt wurde die Niederspannungshauptverteilung am Transformator angenommen.

³⁴ Vgl. ([31], S. 46)

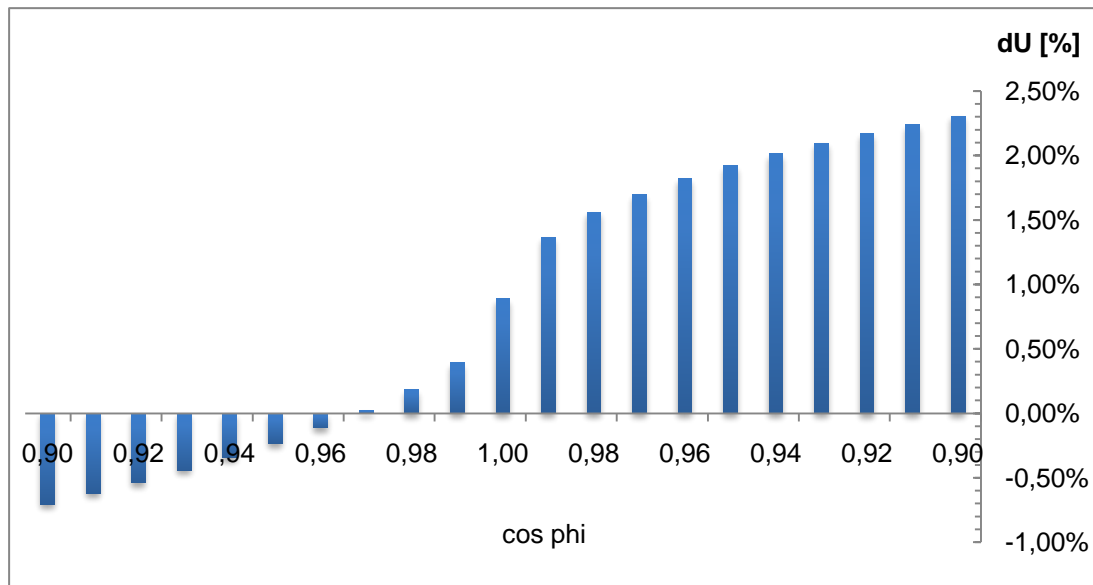


Abbildung 3-7 - Beispiel Beeinflussung der statischen Spannungshaltung durch eine PV-Anlage am Netzverknüpfungspunkt im Bereich $\cos \varphi$ von 0,90 untererregt bis 0,90 übererregt bei konstanter Wirkleistung

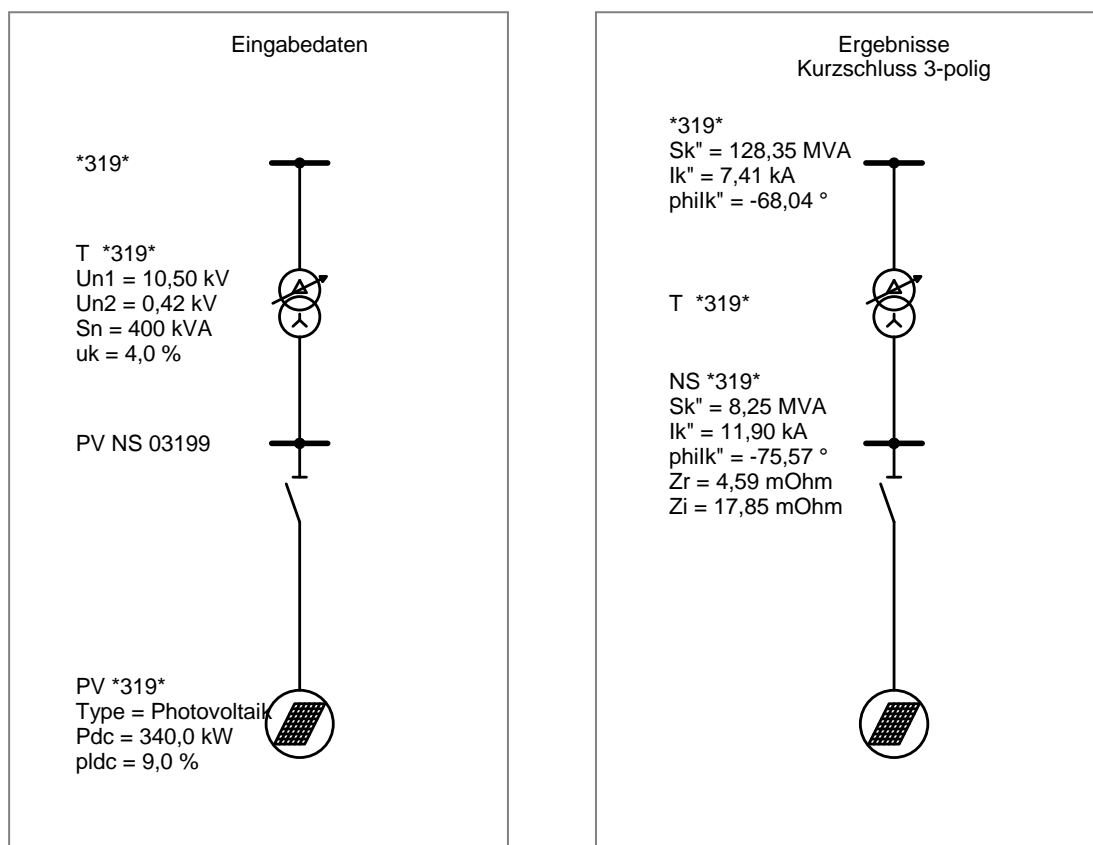


Abbildung 3-8 - Eingabedaten und Ermittlung der Kurzschlusswerte zum Anschluss einer PV-Anlage

3.5 Beeinflussung der Spannungsqualität durch PV-Anlagen

Im welchen Maß PV-Anlagen den Leistungsfluss beeinflussen können, zeigt die nachfolgende Abbildung 3-9. Am 3. Oktober 2013 wurden 67 % der Last in Deutschland durch EE - siehe Abbildung 3-9 - abgedeckt. Die Abbildung 3-9 zeigt aber auch die diskontinuierliche Erzeugungsleistung von Wind- und PV-Anlagen. So betrug die Maximalerzeugung aus EE bei gleichzeitiger Maximallast an diesem Tag in den Abendstunden von 20 bis 22 Uhr, getrieben durch einen noch größeren Wind-Anteil, nur noch rund 50 %.

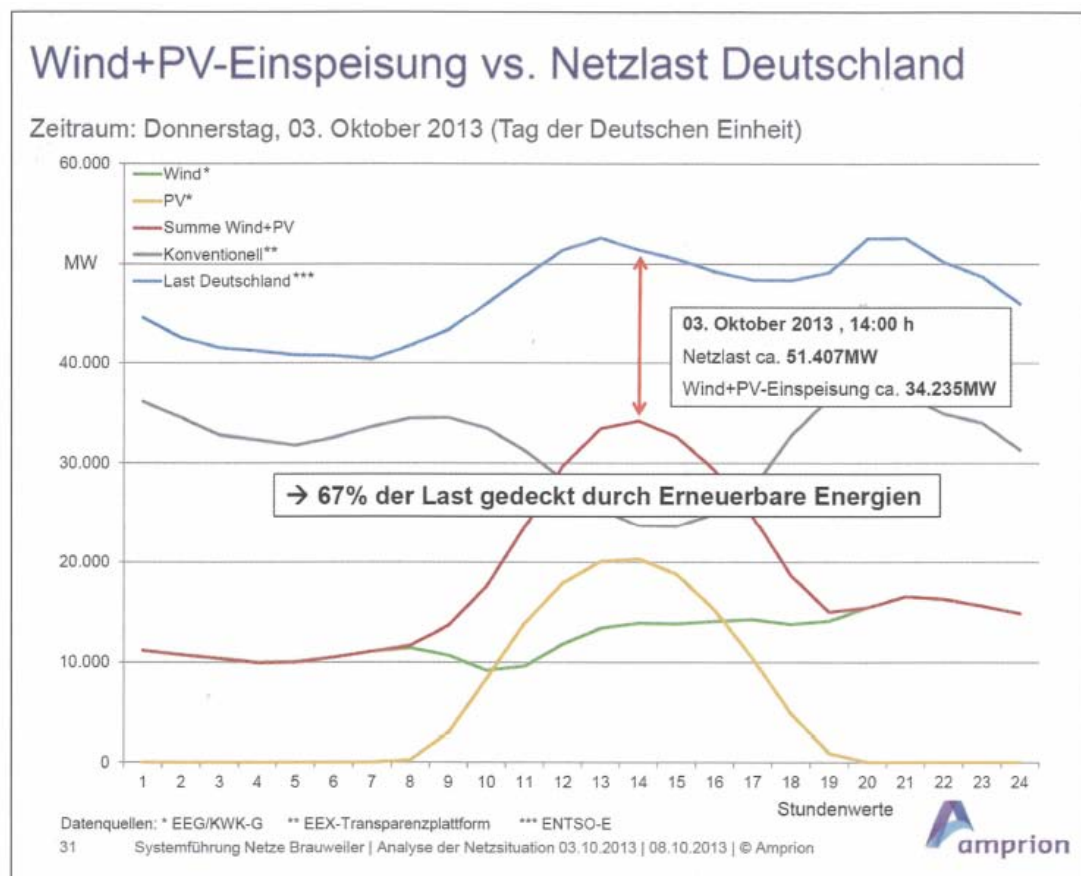


Abbildung 3-9 - Spitzenwert Erzeugung durch EE am 3. Oktober 2013³⁵

Ein großer Teil von PV-Anlagen ist - wie in Abbildung 2-4 auf Seite 10 - an der Niederspannung angeschlossen. Diese diskontinuierliche Erzeugung und der schwankende Verbrauch führen zu bidirektionalen Leistungsflüssen und letztendlich zu zwei Bedingungen im Netz die hinsichtlich der Einhaltung der Spannungsqualität kritisch sein können.

Dies sind die maximale Last bei minimaler oder null dezentraler Einspeisung und zum anderen die minimale Last bei maximaler Einspeisung.

³⁵ Vgl. ([33], S. 7)

Der Verbrauch von elektrischer Leistung verursacht am Verknüpfungspunkt eine Spannungsabsenkung. Dagegen steigt mit der Erzeugung von elektrischer Leistung die Spannung am Verknüpfungspunkt an.

Die Abbildung 3-10 zeigt das mögliche Problem zur Einhaltung des Spannungsbandes in der Niederspannung mit den minimalen und maximalen Grenzwerten von $U_n = 207 \text{ V}$ bzw. $U_n = 253 \text{ V}$ an zwei Verknüpfungspunkten.

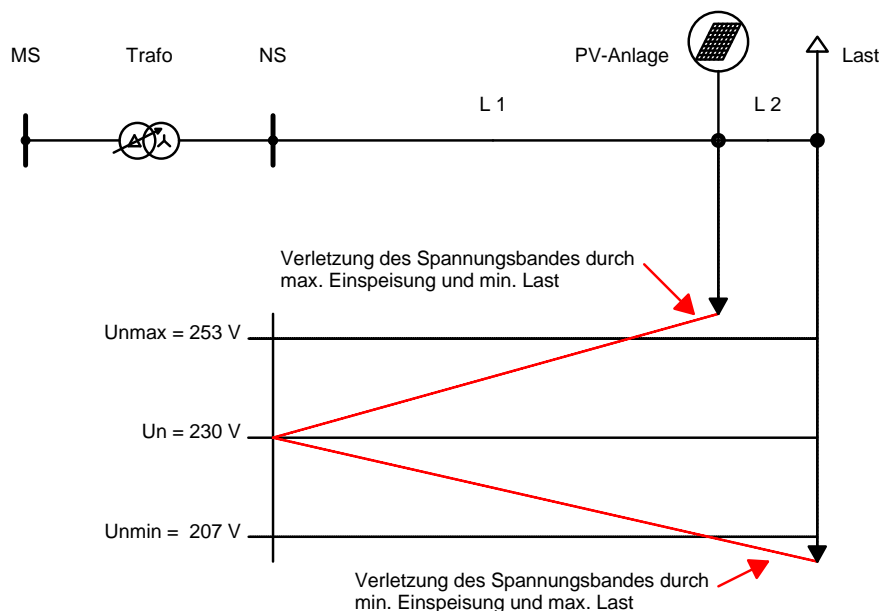


Abbildung 3-10 - beidseitige Verletzung des Spannungsbandes

Einseitige Abweichungen können, wie in Abbildungen 3-11 und 3-12 dargestellt, bedingt durch die Entfernung einzelner Transformatorenstationen zum Umspannwerk und durch die Bandbreite des Spannungsreglers an der Mittelspannung in den Umspannwerken - üblich ist z.B. das Spannungsband $10,2 \text{ kV}$ bis $10,6 \text{ kV}$ - zusätzlich noch verstärkt werden.

Die gleichen Effekte können ebenfalls, durch Änderung des Übersetzungsverhältnisses U_p/U_s am Transformator, auftreten.

Die Probleme der statischen Spannungshaltung können grundsätzlich durch die Veränderung von Netzstrukturen oder durch lokalen Netzausbau behoben werden. Beide Maßnahmen sind jedoch sehr kostenintensiv und führen i.d.R. zu einer schlechteren Auslastung verschiedener Netzbereiche.

Eine weitere zentrale Möglichkeit wäre die dynamische Anpassung der Spannungsbänder in Umspannwerken an die momentanen Erzeuger- und Verbraucherverhältnisse. So könnte bei hoher dezentraler Einspeisung eine niedrige Ausgangsspannung mittels eines nach unten verschobenen Spannungsbandes im Umspannwerk ggf. Abhilfe schaffen.

Dezentral kann durch die Kompensation von Blindleistung - wie in Abbildung 3-7 dargestellt - Einfluss auf die statische Spannungshaltung genommen werden.

All diese Möglichkeiten setzen intelligente Systemlösungen voraus, die in dieser Diplomarbeit nicht betrachtet werden.

Ein wichtiger Baustein intelligenter Systemlösungen ist daher zunächst, die Spannungsqualität mit geeigneter Messtechnik an möglichst allen Transformatorenstationen zu erfassen und Schlussfolgerungen abzuleiten.

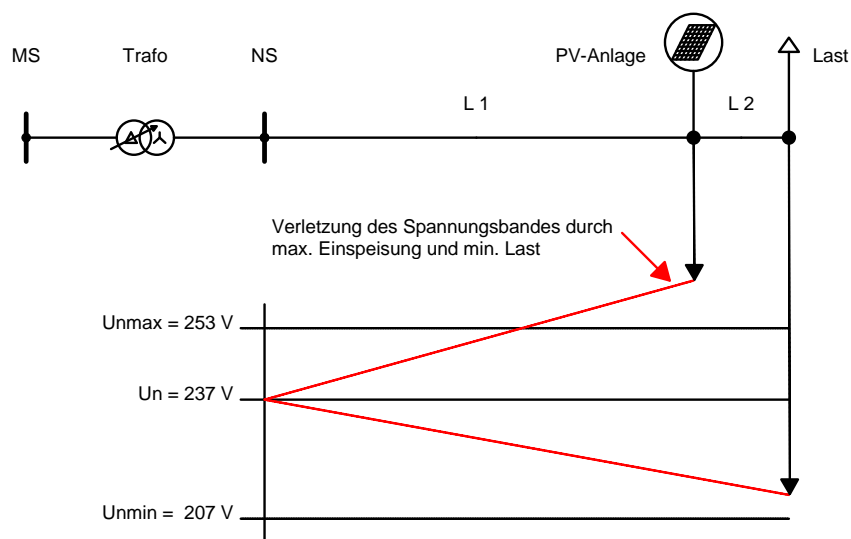


Abbildung 3-11 - einseitige Verletzung oberhalb des Spannungsbandes

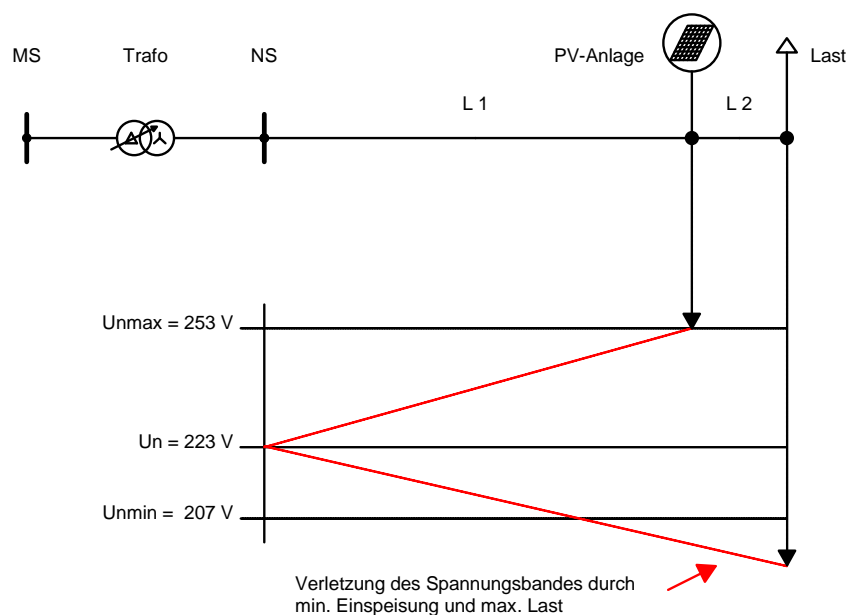


Abbildung 3-12 - einseitige Verletzung unterhalb des Spannungsbandes

4 Anforderungen an die Messverfahren

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung zu den Anforderungen an die Messtechnik und nur zu den Verfahren, zur Messung der Spannungsqualität in 50 Hz Wechselstromnetzen, auf Basis der EN 61000-4-30, die im Zusammenhang mit Kapitel 3.2 zu sehen sind. Zum besseren Verständnis der Auswertung von Power Quality Messungen im Kapitel 5, werden nachstehende Erläuterungen als notwendig erachtet. Wenn nicht anders gekennzeichnet, sind alle Erläuterungen im Kapitel 4, der EN 61000-4-30 entnommen. Daher ist die Herkunft der Informationen nur einmal auf jeder Seite, möglichst am Ende des letzten abgeschlossenen Abschnitts, gekennzeichnet.

4.1 Anzuwendende Norm

Die EN 61000-4-30 legt die Verfahren für die Messung von Merkmalen der Spannungsqualität in 50-/60 Hz Wechselstromversorgungsnetzen und die Interpretation der Ergebnisse dieser Messungen fest. Hierin werden die Messverfahren für alle relevanten Merkmale beschrieben.

4.2 Die EN 61000-4-30

In der EN 61000-4-30 werden Begriffe, Zeit- und Aufrechnungsintervalle, Messunsicherheiten, die Klassen von Messverfahren und die Messverfahren für die einzelnen Parameter selber beschrieben. Die EN 61000-4-30 beschreibt welche Messgrößen in welcher Form für eine allgemeingültige Interpretation erfasst und dargestellt werden müssen. Sie beschreibt jedoch nicht wie diese Messgrößen erfasst und verarbeitet werden.

Alle Betrachtungen und Auswertungen der Diplomarbeit beziehen sich auf ein 50 Hz Wechselstromnetz. Im weiteren Verlauf wird deshalb mit Bezug auf die EN 61000-4-30 nur auf die Messanforderungen in 50 Hz Wechselstromnetzen näher eingegangen.³⁶

4.2.1 Klassen von Messverfahren nach EN 61000-4-30

Für jede in dieser Norm zu messende Größe sind drei Klassen definiert.

Zum Nachweis der Einhaltung von Normen z.B., der EN 50160, muss die verwendete Messtechnik die Anforderungen der Klasse A erfüllen.

³⁶ Vgl. ([37], S. 14)

Für statistische Anwendungen können Messgeräte die die Anforderungen der Klasse S erfüllen, angewendet werden.

Darüber hinaus wird in dieser Norm noch die Klasse B festgelegt, die vermeiden soll ältere Messtechnik nicht mehr zu verwenden jedoch für neue Entwicklungen von Messgeräten, nicht mehr angewendet werden sollte.

In Bezug auf die Messanforderungen für Power Quality Messungen, wird in den folgenden Abschnitten nur auf die Anforderungen der Klasse A eingegangen.

4.2.2 Elektrische Größen

In Abhängigkeit von der Messaufgabe und der Netzform müssen die Messungen in Versorgungsnetzen einphasig oder mehrphasig durchgeführt werden.

4.2.3 Aufrechnung von Messungen über Zeitintervalle - Klasse A

Die Ermittlung der Werte für Versorgungsspannung, Oberschwingungen, Zwischenharmonische und Unsymmetrie muss in einem 50-Hz-Versorgungsnetz ein 10-Perioden-Zeitintervall sein. Die 10-Perioden-Messung muss mit jedem RTC-10 min-Uhrschlag neu synchronisiert werden. RTC bedeutet Real-Time-Clock und ist ein lokales zeiterfassendes Gerät, was zur Implementierung von bestimmten Verfahren als Grundlage in dieser Norm benötigt wird.

Die Werte der 10-Perioden-Zeitintervalle werden anschließend zusätzlich in ein 150-Perioden-Zeitintervall, ein 10-Minuten-Zeitintervall und in ein 2-Stunden-Intervall aufgerechnet.

4.2.4 Aufrechnungsalgorithmus

Die Aufrechnung erfolgt durch die Wurzelbildung aus dem arithmetischen Mittelwert des quadrierten Eingangssignals.

$$\text{Aufrechnung} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2}$$

Formel 4-11 - Berechnung des Aufrechnungssignals nach EN 61000-4-30

4.2.4.1 150-Perioden-Aufrechnung - Klasse A

Die Werte für ein 150-Perioden-Zeitintervall müssen lückenlos aus 15 10-Perioden-Zeitintervallen aufgerechnet werden. Das 150-Perioden-Zeitintervall muss mit dem 10-min-Uhrschlag neu synchronisiert werden. Wenn ein 10-min-Uhrschlag auftritt, beginnt ein neues 150-Perioden-Zeitintervall.³⁷

³⁷ Vgl. ([37], S. 15)

Das laufende 150-Perioden-Zeitintervall läuft bis zu seinem Abschluss weiter. Dies kann zu einer Überlappung der beiden 150-Perioden-Zeitintervallen führen.

4.2.4.2 10-Minuten-Aufrechnung - Klasse A

Die Werte für ein 10-min-Zeitintervall müssen lückenlos aus 10-Perioden-Zeitintervallen aufgerechnet werden.

Der aufgerechnete Wert eines 10-min-Zeitintervalls ist mit der tatsächlichen Uhrzeit zu kennzeichnen. Als Zeitkennung ist die Uhrzeit am Ende der 10-min-Aufrechnung anzugeben.

Jedes 10-min-Intervall muss mit einem RTC-10-min-Uhrschlag beginnen.

Da sich typischerweise das letzte 10-Perioden-Zeitintervall in einem 10-min-Aufrechnungsintervall zeitlich mit einem RTC 10-min-Uhrschlag überlappt, ist jegliches überlappendes 10-Perioden-Zeitintervall in der vorhergehenden Aufrechnung des 10-min-Intervalls einzuschließen.

4.2.4.3 2-Stunden-Aufrechnung - Klasse A

Die Werte für das 2-Stunden-Zeitintervall müssen aus 12 10-Perioden-Zeitintervallen aufgerechnet werden. 2-Stunden-Intervalle beginnen bei geradzahligen RTC-Zeitintervallen und müssen lückenlos und nicht überlappend sein.

4.2.5 Unsicherheit der tatsächlichen Uhrzeit - Klasse A

Die Unsicherheit der tatsächlichen Uhrzeit darf ungeachtet des gesamten Zeitintervalls ± 20 ms nicht überschreiten. Diese Anforderung kann, z.B. durch den Empfang von speziellen Signalen zur Zeitberechnung erfüllt werden.

Kann diese Anforderung nicht erfüllt werden, dann muss die Grenzabweichung der tatsächlichen Uhrzeit kleiner als ± 1 s je 24-Stunden-Intervall sein.

4.2.6 Markierungskonzept

Das Markierungskonzept dient dazu, dass ein einzelnes Ereignis mehrfach in unterschiedlichen Messgrößen berücksichtigt wird. Es zeigt zudem an, dass ein aufgerechneter Wert unzuverlässig sein könnte.

Das Markierungskonzept ist in der Klasse A bei der Messung von Netzfrequenz, Spannungshöhe, Flicker, Unsymmetrie der Versorgungsspannung, Spannungsüberschwingungen, Zwischenharmonischen der Spannung, Netzsignalspannungen und bei Messungen von Unter- und Überschreitungsgrößen anwendbar.³⁸

³⁸ Vgl. ([37], S. 19)

4.3 Merkmale der Spannungsqualität

4.3.1 Beeinflussung eines Merkmals

Durch störende Einflüsse kann ein elektrisches Eingangssignal ungünstig beeinflusst werden.

Deshalb setzt die Messung eines bestimmten Merkmals die in dieser Norm definierten Bedingungen voraus.

Das Ergebnis einer Messung muss dann innerhalb der angegebenen Unsicherheiten liegen, wenn alle anderen Größen in bestimmten Bereichen der Beeinflussungsgrößen liegen.

4.3.2 Netzfrequenz

4.3.3 Messverfahren der Klasse A

Zur Bewertung der Netzfrequenz 50 Hz muss die Frequenzmessung alle 10 s einen Wert liefern. Die gemessene Grundschiwingung (Netzfrequenz) ergibt sich aus dem Verhältnis der während eines 10-s-Uhrzeitintervalls gezählten gesamten Anzahl von ganzen Perioden, geteilt durch die Gesamtdauer aller ganzen Perioden. Vor jeder Beurteilung müssen Oberschwingungen und Zwischenharmonische abgeschwächt werden, um die Auswirkungen von mehrfachen Nulldurchgängen zu minimieren.

$$f_{0m} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{i_{voll}}}{t_{gesamt}(P_{i_{voll}})}$$

Formel 4-12 - Bestimmung der gemessenen Frequenz

Die Messzeitintervalle dürfen sich nicht überlappen. Einzelne Perioden die die 10-s-Echtzeit nicht überlappen, werden nicht berücksichtigt. Für die Unsicherheit der absoluten 10-s-Uhrzeit gelten die genannten Grenzwerte in Punkt 4.2.3.5.

4.3.3.1 Messunsicherheit, Messbereich und Durchführung Klasse A

Die Messunsicherheit darf unter den in dieser Norm beschriebenen Bedingungen ± 10 mHz in den Messbereich 42,5 Hz bis 57,5 Hz nicht überschreiten.

Die Frequenzmessung muss mit dem Referenzkanal durchgeführt werden.³⁹

³⁹ Vgl. ([37], S. 20)

4.4 Höhe der Versorgungsspannung

In Anlehnung an die EN 50160 beträgt die Mindestbeobachtungsdauer - siehe auch Punkt 3.3.2 - eine Woche. Zu betrachten ist der 10-min-Wert.

4.4.1 Messverfahren - Klasse A

Zur Bewertung wird die Höhe der Versorgungsspannung über den Effektivwert bestimmt. Der Effektivwert oder auch quadratischer Mittelwert genannt, einer sinusförmigen Wechselspannung U_{eff} (im englischen U_{rms} Root Mean Square) kann mit folgender Formel beschrieben werden.

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_0+T} u^2(t) dt}$$

Formel 4-13 - Berechnung des Effektivwertes einer sinusförmigen Wechselspannung⁴⁰

Die Höhe der Versorgungsspannung, dargestellt als Effektivwert, wird über ein 10-Perioden-Zeitintervall ermittelt. Jedes 10-Perioden-Zeitintervall muss zusammenhängend sein und darf sich nicht mit dem benachbarten 10-Perioden-Zeitintervall überlappen, ausgenommen mit einem RTC 10-min-Uhrschlag.

4.4.2 Messunsicherheit und Messbereich

Unter den in dieser Norm beschriebenen Bedingungen darf die Messunsicherheit $\pm 0,1 \%$ von U_{din} im Bereich von 10% von U_{din} bis 150% von U_{din} nicht überschreiten.

4.4.3 Aufrechnung

Für die Aufrechnung gelten die in Punkt 4.2.3 und 4.2.4 beschriebenen Regeln.

4.5 Einbrüche und Überhöhung der Versorgungsspannung

Die Mindestbeobachtungsdauer beträgt ein Jahr. Die Nennspannung ist zwischen den Vertragspartnern zu vereinbaren. In der Niederspannung ist i.d.R. die Nennspannung die vereinbarte Spannung. In der Mittel- und Hochspannung können die Werte der Nennspannung von den üblichen Werten wie, z.B. 10 kV, abweichen.

4.5.1 Messverfahren - Klasse A

Für die grundlegende Bestimmung des Effektivwertes U_{eff} eines Spannungseinbruchs oder Spannungsüberhöhung ist die Bestimmung des Effektivwertes $U_{eff(1/2)}$ für jeden einzelnen Messkanal notwendig.⁴¹

⁴⁰ Vgl. ([38], 2014)

4.5.2 Erkennung eines Spannungseinbruchs

Der Schwellwert für einen Spannungseinbruch ist entweder ein Prozentwert von U_{din} oder von der gleitenden Referenzspannung U_{sr} . Die gleitende Referenzspannung U_{sr} wird in Niederspannungsnetzen grundsätzlich nicht verwendet. Die Anwendung einer gleitenden Referenzspannung ist freigestellt und stellt keine Anforderung dar. Bei Verwendung der Referenzspannung gelten die Anforderungen in Abschnitt 4.5.4.

Die Erkennung eines Spannungseinbruchs ist von der Netzform abhängig.

Im Einphasennetz beginnt der Spannungseinbruch mit Unterschreitung des Schwellenwertes von U_{eff} und endet wenn er gleich oder oberhalb plus Hysteresespannung des Schwellenwertes ist.

Im Mehrphasennetz beginnt der Spannungseinbruch mit Unterschreitung des Schwellenwertes von U_{eff} in einem Messkanal und endet wenn er gleich oder oberhalb plus Hysteresespannung des Schwellenwertes in allen Messkanälen ist.

Die Hysterese ist üblicherweise gleich 2 % von U_{din} .

4.5.2.1 Auswertung eines Spannungseinbruchs

Ein Spannungseinbruch ist durch ein Datenpaar - entweder die Restspannung (kleinster Spannungswert von U_{eff} in irgendeinem Kanal) oder die Tiefe sowie die Dauer - charakterisiert.

4.5.3 Erkennung einer Spannungsüberhöhung

Der Schwellwert für eine Spannungsüberhöhung ist entweder ein Prozentwert von U_{din} oder von der gleitenden Referenzspannung U_{sr} . Die gleitende Referenzspannung U_{sr} wird in Niederspannungsnetzen grundsätzlich nicht verwendet. Die Anwendung einer gleitenden Referenzspannung ist freigestellt und stellt keine Anforderung dar.

Bei Verwendung der Referenzspannung gelten die Anforderungen in Abschnitt 4.5.4.

Die Erkennung einer Spannungsüberhöhung ist von der Netzform abhängig.

Im Einphasennetz beginnt die Spannungsüberhöhung mit Überschreitung des Schwellenwertes von U_{eff} und endet wenn er gleich oder unterhalb plus Hysteresespannung des Schwellenwertes ist.⁴²

⁴¹ Vgl. ([37], S. 22)

⁴² Vgl. ([37], S. 22)

Im Mehrphasennetz beginnt die Spannungsüberhöhung mit Überschreitung des Schwellenwertes von U_{eff} in einem Messkanal und endet wenn er gleich oder unterhalb plus Hysteresespannung des Schwellenwertes in allen Messkanälen ist.

Die Hysterese ist üblicherweise gleich 2 % von U_{din} .

4.5.3.1 Auswertung einer Spannungsüberhöhung

Eine Spannungsüberhöhung ist durch ein Datenpaar- der Höchstwert der Spannungsüberhöhung und die Dauer - charakterisiert.

Der Höchstwert einer Spannungsüberhöhung ergibt sich aus dem während einer Spannungsüberhöhung in allen Kanälen höchst gemessenen Wert.

Die Anfangszeit eines Spannungseinbruchs muss mit dem Zeitpunkt des Endes der Spannung U_{rms} des Messkanals markiert werden, der den Vorgang auslöst. Die Endzeit eines Spannungseinbruchs muss mit dem Zeitpunkt des Endes der Spannung U_{rms} des Messkanals markiert werden, der den Vorgang beendet hat. Der Vorgang ist durch den Schwellenwert plus Hysterese definiert.

4.5.3.2 Messunsicherheit der Spannungsüberhöhung - Klasse A

Die Messunsicherheit darf $\pm 0,2$ % von U_{din} nicht überschreiten.

4.5.3.3 Unsicherheit der Zeitdauermessung

Die Messunsicherheit der Zeitdauer bei einem Spannungseinbruch oder einer Spannungsüberhöhung entspricht der Summe der Unsicherheiten am Anfang und am Ende - einer Halbperiode - eines Spannungseinbruchs oder einer Spannungsüberhöhung.

4.5.4 Berechnung einer gleitenden Referenzspannung

Sofern für die Erfassung eines Spannungseinbruchs oder einer Spannungsüberhöhung eine gleitende Referenzspannung genutzt wird, muss diese mit Hilfe eines Filters 1. Ordnung mit einer Zeitkonstante von 1 min ermittelt werden.⁴³

Dieses Filter wird beschrieben durch:

$$U_{sr(n)} = 0,9667 \times U_{sr(n-1)} + 0,0033 \times U_{(10)rms} \text{ mit}$$

Formel 4-14 - Berechnung der gleitenden Referenzspannung

$U_{sr(n)}$ der aktuelle Wert der gleitenden Referenzspannung,

$U_{sr(n-1)}$ der vorherige Wert der der gleitenden Referenzspannung und

$U_{(10)rms}$ der zuletzt ermittelte 10-Perioden-Effektivwert.

⁴³ Vgl. ([37], S. 25)

Mit Beginn der Messung ist der Anfangswert der gleitenden Referenzspannung auf den Wert der vereinbarten Eingangsspannung zu setzen. Die Referenzspannung ist alle 10 Perioden zu erneuern. Für den Fall das ein 10-Perioden-Wert markiert ist, muss der vorherige Wert weiter verwendet werden.

4.6 Spannungsunterbrechung

Die Mindestbeobachtungsdauer für Spannungsunterbrechungen beträgt ein Jahr.

Aufgrund der Sensibilität von Endverbrauchern sind in der Praxis, durch Besonderheiten in den verschiedensten Produktionsbereichen, unterschiedlichste Vereinbarungen notwendig.

Die Vertragspartner müssen sich auf Parameter, die kurze und lange Spannungsunterbrechungen eindeutig voneinander abgrenzen, einigen.

In der EN 50160 wird im Anhang B zwischen kurzen Versorgungsunterbrechungen und zufälligen langen Versorgungsunterbrechungen unterschieden.

Eine kurze Versorgungsunterbrechung ist durch eine Unterbrechungszeit kleiner 3 min und einer Nennspannung kleiner 1 % von U_n gekennzeichnet.

Eine zufällige lange Versorgungsunterbrechung ist durch eine Unterbrechungszeit von größer 3 min und einer Nennspannung kleiner 1 % von U_n gekennzeichnet.

Darüber hinaus gelten für Netzbetreiber zur Einhaltung von Qualitätsschlüsseln weitere Anforderungen.

4.6.1 Messverfahren - Klasse A

Für die Spannungsunterbrechung gelten die gleichen Messverfahren wie für Einbrüche oder Überhöhung der Versorgungsspannung - siehe Punkt 4.5.

4.6.2 Bestimmung einer Spannungsunterbrechung

Die Bestimmung einer Spannungsunterbrechung ist wie bei einer Spannungsüberhöhung- oder einbruchs von der Netzform abhängig.⁴⁴

Im einen Einphasennetz beginnt die Spannungsunterbrechung, wenn die Spannung U_{rms} unterhalb des Schwellenwertes der Spannungsunterbrechung fällt. Sie endet, wenn die Spannung U_{rms} gleich oder oberhalb des Schwellenwertes der Spannungsunterbrechung plus der Hysteresespannung ist.

⁴⁴ Vgl. ([37], S. 26)

Im einen Mehrphasennetz beginnt die Spannungsunterbrechung, wenn die Spannungen U_{rms} in allen Kanälen unterhalb des Schwellenwertes der Spannungsunterbrechung fällt. Sie endet, wenn die Spannung U_{rms} einen beliebigen gemessenen Kanal gleich oder oberhalb des Schwellenwertes der Spannungsunterbrechung plus der Hysteresespannung ist.

Die Hysteresespannung beträgt typischerweise 2 %. Von U_{din} .

Die Anfangszeit einer Spannungsunterbrechung muss mit dem Zeitpunkt des Endes der Spannung U_{rms} des Messkanals markiert werden, der den Vorgang auslöst. Die Endzeit einer Spannungsunterbrechung muss mit dem Zeitpunkt des Endes der Spannung U_{rms} des Messkanals markiert werden, der den Vorgang beendet hat. Der Vorgang ist durch den Schwellenwert plus Hysterese definiert.

4.6.3 Messunsicherheit und Messbereich

Die Messunsicherheit der Zeitdauer bei einem Spannungseinbruch oder einer Spannungsüberhöhung entspricht der Summe der Unsicherheiten am Anfang und am Ende - einer Halbperiode – eines Spannungseinbruchs oder einer Spannungsüberhöhung.

4.7 Flicker

Die Mindestbeobachtungsdauer beträgt eine Woche.

Für die Beurteilung können die 10-min-Werte (P_{st}), wobei dieser Wert in der EN 50160 nicht definiert ist, und/oder die 2-h-Werte (P_{lt}), nach EN 50160 mit dem Wert 1 definiert, betrachtet werden. Zwischen Netzbetreiber und Anschlussnehmer können aufgrund besonderer Randbedingungen wie, z.B. hochempfindlicher Verbraucher, gesonderte Vereinbarungen vertraglich geregelt werden.

4.7.1 Messverfahren - Klasse A

Für die Messverfahren von Flickern in 50 Hz Wechselstromnetzen gilt die gesonderte Norm IEC 61000-4-15.

4.7.2 Messunsicherheit und Messbereich

Es gelten die Festlegungen der IEC 61000-4-15.⁴⁵

Zu beachten ist, dass die in Punkt 4.3.1 zu beeinflussenden Merkmale eingehalten werden müssen. Unter diesen Bedingungen muss die erforderliche Messunsicherheit im Bereich von P_{st} gleich 0,4 bis 10 eingehalten werden.

⁴⁵ Vgl. ([37], S. 21)

4.7.3 Durchführung der Messung – Klasse A

Da Spannungseinbrüche, Spannungsunterbrechungen und Spannungsüberhöhungen am Ausgang eines Flickermeters Werte von P_{st} und P_{it} erzeugen, müssen diese markiert werden.

Das für den P_{st} 10-min-Zeitintervall muss mit einem RTC-10-min-Uhrschlag beginnen und mit der absoluten (tatsächlichen) Uhrzeit gekennzeichnet werden.

4.7.4 Aufrechnung - Klasse A

Für den P_{it} muss die Aufrechnung entsprechend IEC 61000-4-15 über 2 h wie in Punkt 4.2.4.3 durchgeführt werden.

4.8 Unsymmetrie der Versorgungsspannung

Wie bereits in Punkt 3.3.5 erläutert, liegt eine Unsymmetrie in einem Dreiphasenspannungssystem dann vor, wenn mindestens eine der drei Amplituden von den anderen beiden Amplituden abweicht oder die drei Phasenwinkel sich nicht genau um 120 Grad voneinander unterscheiden.

Die Mindestbeobachtungsdauer beträgt eine Woche. Für die Beurteilung werden die 10-min-Werte und/oder die 2-h-Werte verwendet.

4.8.1 Messverfahren - Klasse A

Die Ermittlung der Unsymmetrie der Versorgungsspannung erfolgt mit Hilfe der Methode der symmetrischen Komponenten. Mit dieser Methode wird ein unsymmetrisches Drehstromsystem, in drei symmetrische Komponentensysteme überführt. Neben der Mitsystemkomponente U_m ist mindestens auch eine Gegensystemkomponente U_g und/oder Nullsystemkomponente U_0 vorhanden.

Das Mitsystem U_m eines Drehspannungssystems ist ein gleich der Drehrichtung des Drehspannungsversorgungsnetzes mitlaufendes Drehspannungssystem.

Das Gegensystem U_g ist ein dem Drehspannungsversorgungsnetz entgegen verlaufendes Drehspannungssystem.

Im Nullsystem U_0 eines Drehspannungsversorgungsnetzes liegen alle Zeiger in gleicher Phasenlage.⁴⁶

Mit der Einführung der Drehoperatoren $a = e^{j120^\circ}$ und $a^2 = e^{j240^\circ}$ kann folgende Symmetrierungsvorschrift aufgestellt werden:⁴⁷

⁴⁶ Vgl. ([37], S. 27)

⁴⁷ Vgl. ([1], S. 30)

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_m \\ \underline{U}_g \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix}$$

Für die Entsymmetrierung gilt dann:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_m \\ \underline{U}_g \end{bmatrix}$$

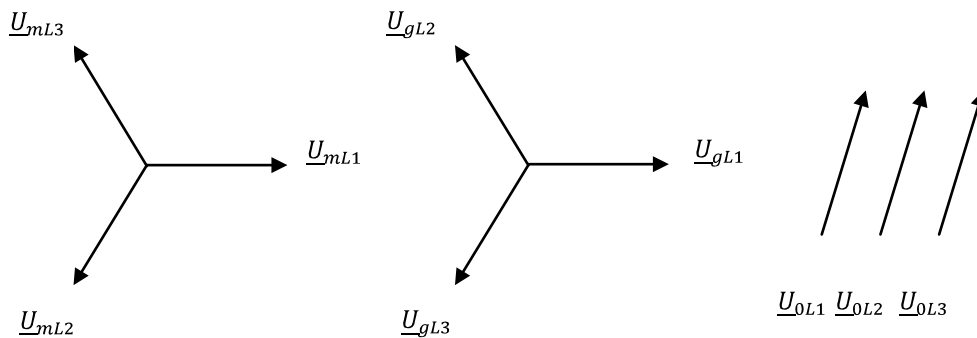


Abbildung 5-13 - Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem eines im Uhrzeigersinn verlaufendes Drehspannungsversorgungsnetz

Der Grundswingungsanteil des Spannungseingangssignals ist über ein 10-Perioden-Zeitintervall zu messen. Um den Einfluss von Oberschwingungen zu minimieren wird entweder ein Filter oder ein DFT-Algorithmus (Diskrete Fourier Transformation) verwendet.

Das als Prozentwert ausgedrückte Verhältnis der Gegensystemkomponente U_g wird wie folgt bestimmt:

$$u_g = \frac{U_g}{U_m} 100\% = \frac{\text{Gegensystemkomponente}}{\text{Mitsystemkomponente}} 100\%$$

Formel 4-15 - Berechnung der Gegensystemkomponente als Prozentwert

Das als Prozentwert ausgedrückte Verhältnis der Nullsystemkomponente U_0 wird wie folgt bestimmt:

$$u_0 = \frac{U_0}{U_m} 100\% = \frac{\text{Nullsystemkomponente}}{\text{Mitsystemkomponente}} 100\%$$

Formel 4-16 - Berechnung der Nullsystemkomponente als Prozentwert

In Dreiphasensystemen, in denen nur die Spannungen zwischen den Phasenleitern, wie z.B. in der Mittelspannung und nur die Grundswingungsspannungen betrachtet werden, kann geschrieben werden:

$$u_g = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100\% \text{ mit } \beta = \frac{U_{12(0)}^4 + U_{23(0)}^4 + U_{31(0)}^4}{(U_{12(0)}^2 + U_{23(0)}^2 + U_{31(0)}^2)^2}$$

Formel 4-17 - Berechnung der Gegensystemkomponente bei ausschließlicher Betrachtung der Leiter-Leiter-Spannungen als Prozentwert⁴⁸

Die Indizes $U_{12(0)}^*$ für Leiter-Leiter Spannung $U_1 - U_2$ und (0) für Grundschwingung.

Die Indizes $U_{23(0)}^*$ für Leiter-Leiter Spannung $U_2 - U_3$ und (0) für Grundschwingung.

Die Indizes $U_{31(0)}^*$ für Leiter-Leiter Spannung $U_3 - U_1$ und (0) für Grundschwingung.

4.8.2 Messunsicherheit und Messbereich

Die Unsicherheit der Messung einer dreiphasigen Wechselspannung muss kleiner gleich $\pm 0,15 \%$ für das Gegen- und Nullsystem sein, wenn die Anforderungen des Prüfzustandes 1 dieser Norm erfüllt sind. Beispielsweise muss ein Messgerät, das mit einem Gegensystem von 1% beaufschlagt wird, einen Messwert x im Bereich $0,85 \% \leq x \leq 1,15 \%$ liefern.

4.8.3 Auswertung der Messung und Aufrechnung

Für die Auswertung der Messung bestehen keine Anforderungen.

Für die Aufrechnung gelten die Anforderungen wie in Punkt 4.2.3 und 4.2.4.

4.9 Oberschwingungsspannungen

Wie bereits im Punkt 3.3.6 werden Oberschwingungen vorwiegend verursacht durch Betriebsmittel mit nichtlinearer Spannung-Strom-Charakteristik.

Nicht sinusförmige, periodische Verläufe von Strom oder Spannung werden mit Hilfe der Fourier-Reihenentwicklung in sinus- und cosinusförmige Anteile zerlegt.

Diese Anteile werden als Oberschwingungen (OS) oder Harmonische bezeichnet.⁴⁹ Mit der Grundschwingung des Versorgungsnetzes $f_0 = 50 \text{ Hz}$ beträgt die erste ganzzahlige Oberschwingung $f_1 = 100 \text{ Hz}$.

Mit Angabe von Betrag und Phasenwinkel der harmonischen Schwingungen kann - siehe Abbildungen 4-14 und 4-15 - jede periodische Funktion in einem diskreten Amplituden- und Phasenspektrum abgebildet werden.

Hinweis:

⁴⁸ Vgl. ([37], S. 29)

⁴⁹ Vgl. ([40], S. 31)

Die Werte für die Amplituden stammen aus einer aktuellen Messung. Auf die Darstellung der Grundschiwingung ($f_0 = 100\%$) wurde verzichtet. Die Phasenwinkel konnten aus der Messung nicht entnommen werden. Daher wurden die Werte zur Darstellung des Phasenspektrums frei gewählt.

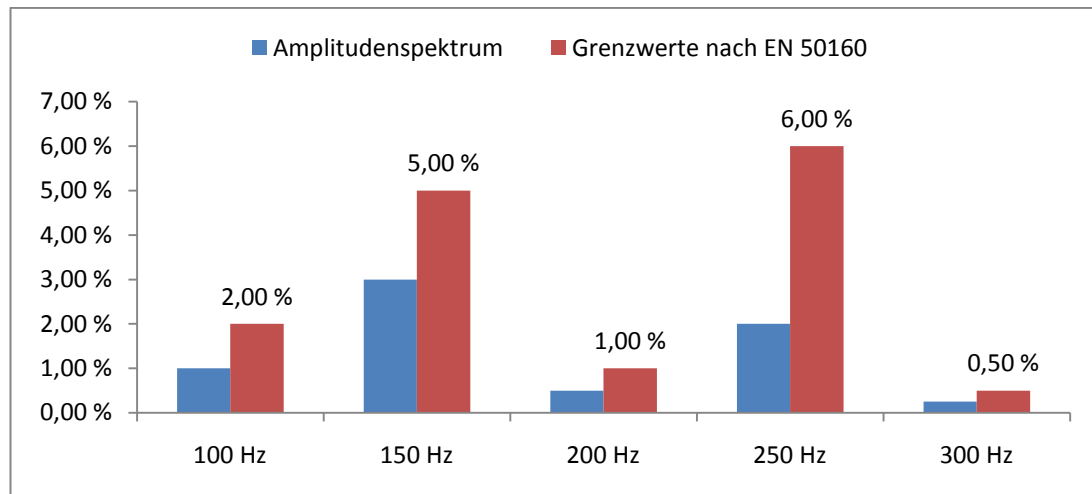


Abbildung 4-14 - Beispiel Amplitudenspektrum 1. bis 6. Oberschwingungsspannung

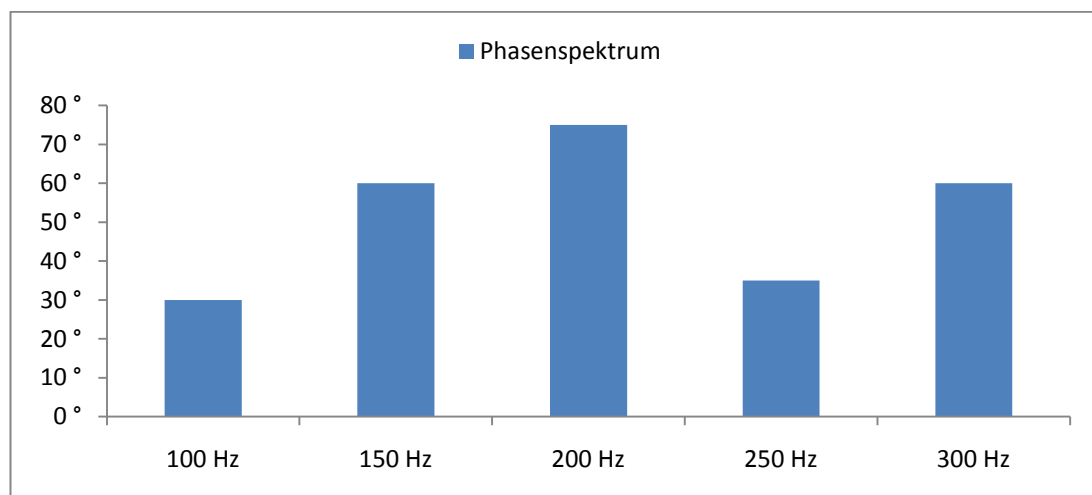


Abbildung 4-15 - Beispiel Phasenspektrum 1. bis 6. Oberschwingungsspannung

Im folgenden Kapitel 5 wird in dem zur Verfügung stehenden Normbericht nach EN 50160, zur Bewertung der Spannungsqualität eines Versorgungsnetzes, nur die Darstellung des Amplitudenspektrums der Oberschwingungsspannung genutzt. Die Phasenlagen der Oberschwingungsspannungen werden nicht betrachtet.

Eine verzerrte Größe der Netzspannung wird mit Hilfe der Fourier-Reihe in sinusförmige Anteile der Grundschiwingung und in sinus- oder cosinusförmige Anteile mit den n-fachen der Grundschiwingung zerlegt.

Die folgende Abbildung 4-16 zeigt eine starke Verzerrung der Spannung, die durch die Summation der Grundschiwingung mit der dritten harmonischen

Oberschwingungsspannung und die Summation der Grundschnwingung mit der dritten einschließlich f5nfter harmonischer Oberschnwingungsspannung entstehen.⁵⁰

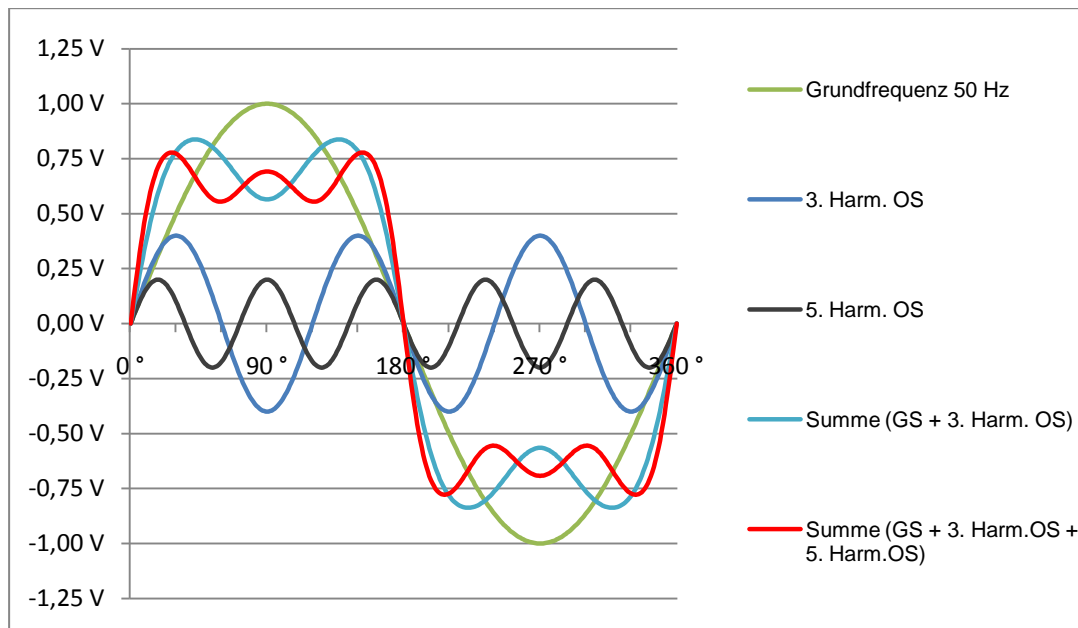


Abbildung 4-16 - Summation von periodischen Sinusspannungen mit 50 Hz, 150 Hz und 250 Hz

4.9.1 Messverfahren - Klasse A

Das grundlegende Messverfahren der Oberschnwingungsspannung ist in der IEC 61000-4-7, Klasse 1 festgelegt. Diese Norm muss zur Durchf5hrung einer l5ckenlosen 10-Perioden-Messung einer Oberschnwingungsuntergruppe, laut IEC 61000-4-7 mit $U_{sg,n}$ bezeichnet, verwendet werden.

4.9.2 Messunsicherheit und Messbereich

Die Werte f5r maximale Unsicherheit ist in der IEC 61000-4-7, Klasse 1 festgelegt. Diese Werte m5ssen mindestens eingehalten werden.

Der Messbereich muss 10 % bis 200 % der Vertr5glichkeitspegel Klasse 3 der IEC 61000-2-4 betragen.

4.9.3 Auswertung der Messung und Aufrechnung

F5r die Auswertung der Messung bestehen keine Anforderungen.

F5r die Aufrechnung gelten die Anforderungen wie Punkt 4.2.3 und 4.2.4.⁵¹

⁵⁰ Vgl. ([40], S. 31)

⁵¹ Vgl. ([37], S. 29)

4.10 Schnelle Spannungsänderungen

Unter einer schnellen Spannungsänderung wird ein schneller Wechsel zwischen zwei stationären Zuständen des Effektivwertes der Netzspannung verstanden.

Mit Bezug auf die EN 50160 soll in Niederspannungsnetzen die Abweichung von der Nennspannung in der Regel nicht mehr als 5 % betragen. Ausnahmen von Abweichungen bis 10 % von der Nennspannung sind aber mehrmals täglich möglich.

Als charakteristisches Merkmal kann z.B., die Differenz zwischen dem stationären Wert nach dem Einschalten einer Last und dem stationären Wert vor dem Einschalten der Last angesehen werden.

Für das Messen gelten besondere Anforderungen, da die Schwellwerte für einen Spannungseinbruch und einer Spannungsüberhöhung nicht unterschritten bzw. überschritten werden dürfen. Dies würde gegebenenfalls zu falschen Schlussfolgerungen führen.

4.10.1 Messverfahren - Klasse A

Für die Bestimmung der Unter- und Überabweichung kann der 10-Perioden-Wert als Prozentwert von U_{din} verwendet werden. Der Unterabweichungswert $U_{\text{rms-unter}}$ und Überabweichungswert $U_{\text{rms-über}}$ werden mit folgenden Gleichungen bestimmt:

Bestimmung der Unterabweichung

Wenn $U_{\text{rms-200 ms}, i} > U_{\text{din}}$ dann gilt $U_{\text{rms-unter}, i} = U_{\text{din}}$

Für den Fall, dass der 200 ms-Effektivwert U_{rms} größer ist als die vereinbarte Versorgungsspannung U_{din} , dann gilt für den Unterschwellwert $U_{\text{rms-unter}, i}$ die vereinbarte Versorgungsspannung U_{din} .

Wenn $U_{\text{rms-200 ms}, i} \leq U_{\text{din}}$ dann gilt $U_{\text{rms-unter}, i} = U_{\text{rms-200 ms}, i}$

Für den Fall, dass der 200 ms-Effektivwert U_{rms} kleiner ist als die vereinbarte Versorgungsspannung U_{din} , dann gilt für den Unterschwellwert $U_{\text{rms-unter}, i}$ der 200 ms-Effektivwert U_{rms} .

Bestimmung der Überabweichung

Wenn $U_{\text{rms-200 ms}, i} < U_{\text{din}}$ dann gilt $U_{\text{rms-über}, i} = U_{\text{din}}$

Für den Fall, dass der 200 ms-Effektivwert U_{rms} kleiner ist als die vereinbarte Versorgungsspannung U_{din} , dann gilt für den Überschwellwert $U_{\text{rms-über}, i}$ die vereinbarte Versorgungsspannung U_{din} .

Wenn $U_{\text{rms-200 ms}, i} \geq U_{\text{din}}$ dann gilt $U_{\text{rms-über}, i} = U_{\text{rms-200 ms}, i}$

Für den Fall, dass der 200 ms-Effektivwert U_{rms} größer ist als die vereinbarte Versorgungsspannung U_{din} , dann gilt für den Überschwellwert $U_{rms-über, i}$ der 200 ms-Effektivwert U_{rms} .⁵²

4.10.2 Messunsicherheit und Messbereich

Unter den in dieser Norm beschriebenen Bedingungen darf die Messunsicherheit $\pm 0,1 \%$ von U_{din} im Bereich von 10% von U_{din} bis 150% von U_{din} nicht überschreiten.

4.10.3 Aufrechnung

Für die Aufrechnung müssen zunächst die Unterabweichungswert und Überabweichungswert berechnet werden. Im Weiteren gelten die in Punkt 4.2.3 und 4.2.4 beschriebenen Regeln.

Die Bestimmung der Unterabweichung ist wie folgt zu berechnen:

$$U_{unter} = \frac{U_{din} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{rms-unter,i}^2}{n}}}{U_{din}} [\%]$$

Abbildung 4-17 - Bestimmung des Unterabweichungswertes

Für n gilt = Anzahl der 10-Perioden-Effektivwerte der Unter- oder Überabweichung während des Aufrechnungsintervalls und für $U_{rms-unter, i}$ = der i-te 10-Perioden-Effektivwert.

Die Bestimmung der Überabweichung ist wie folgt zu berechnen:

$$U_{über} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{rms-über,i}^2}{n}} - U_{din}}{U_{din}} [\%]$$

Abbildung 4-18 - Bestimmung des Überabweichungswertes

Für $U_{rms-über, i}$ = der i-te 10-Perioden-Effektivwert.

⁵² Vgl. ([37], S. 32)

5 Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Messungen

In diesem Kapitel erfolgt die technische Erläuterung des Mittelspannungsringes einschließlich dazugehöriger Transformatorstationen. Im Anschluss werden der Aufbau der Messungen erläutert, die Messergebnisse ausgewertet und die daraus gewonnenen Erkenntnisse beschrieben.

5.1 Beschreibung und Aufbau des Mittelspannungsringes

Der offene Mittelspannungsring mit einer Gesamtlänge von 10,157 km wird mit einer verkettenden Betriebsspannung von $U_B = 10$ kV betrieben. Die jeweiligen Teillängen betragen bis zur Trennstelle - siehe Abbildung 5-19 - 5,083 km und 5,074 km. Beide Umspannwerke werden über ein gemeinsames vermaschtes 110 kV Netz betrieben. Über den Mittelspannungsring werden 16 Ortsnetzstationen versorgt. Die Gesamtreaktanz und die Gesamtresistanz der MS-Leitungen betragen mit $R_1 = 1,06$ Ohm bzw. $X_1 = 1,20$ Ohm.

Wie bereits in der Einleitung erörtert, wurde für die Auswertung ein Mittelspannungsring ausgewählt, der die typischen Eigenschaften der Versorgungsstruktur sowie, mit Bezug auf das Verbraucherverhalten, deren charakteristischen Eigenschaften in der SWE Netz GmbH widerspiegelt.

So versorgen sechs der sechzehn Ortsnetzstationen reine Wohngebiete. Vier Ortsnetzstationen befinden sich in einem kleineren Gewerbegebiet. Die restlichen sechs Ortsnetzstationen dienen der Versorgung in Gebieten, mit Bürogebäuden, kleineren Gewerben und Wohnkomplexen.

In der folgenden Abbildung 5-19 ist der Aufbau des Mittelspannungsringes dargestellt. Sie zeigt den schematischen Aufbau der Versorgungsstruktur von den Umspannwerken bis zu den Ortsnetzstationen mit MS-Sammelschiene, Transformator, Niederspannungsverteilung und allgemeiner Last. Das mit „M“ gekennzeichnete Symbol zeigt auf die Stellen, an denen die Messungen in den einzelnen Ortsnetzstationen durchgeführt wurden. Für die Darstellung wurden die Berechnungsergebnisse der minimalen dreipoligen Kurzschlusswerte nach VDE 0102/2002 mit genutzt.

Die Ergebnisse der Kurzschlussberechnung weisen an den Ortsnetzstationen, insbesondere an den Ortsnetzstationen 8 und 9, nahezu gleiche Werte auf. Diese ergeben sich aus den fast identischen Ausgangsbedingungen in den Umspannwerken und den annähernd symmetrischen Kabellängen- und Impedanzen.

Wie in Punkt 3.4.7.3 wurden diese mit der Planungs- und Simulationssoftware PSS SINCAL Version 10.5 von der Firma Siemens ermittelt. Die verwendeten Eingabedaten befinden sich in der Anlage Teil 1.

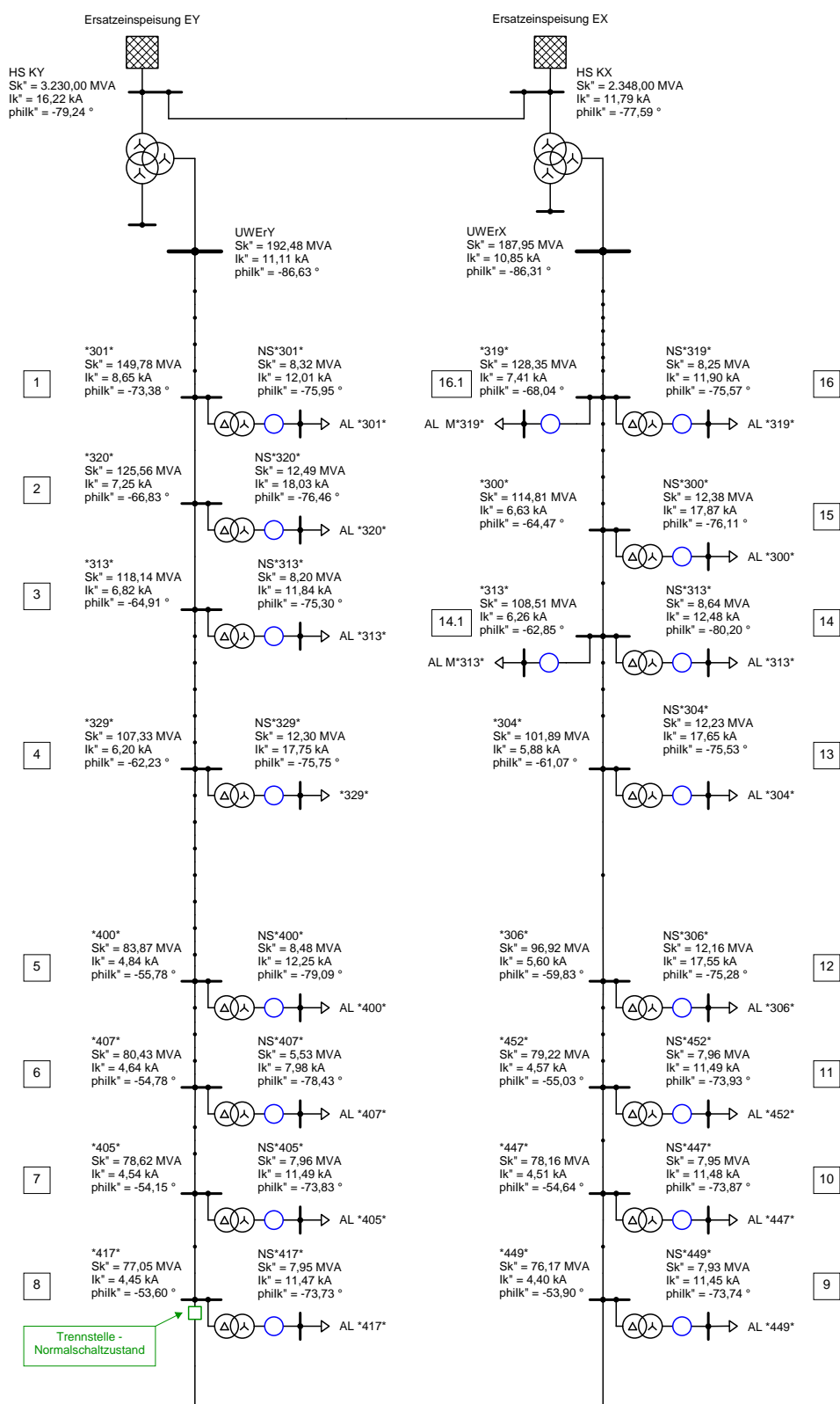


Abbildung 5-19 - Schematischer Aufbau Mittelspannungsring einschließlich Darstellung der Ergebnisse dreipoliger Kurzschlusswerte

5.2 Messgeräteauswahl

Für alle durchgeführten Messungen wurde die PQ-Box 100 expert von der Firma A-Eberle GmbH & Co. KG verwendet. Dieses Gerät ist ein, für den mobilen Einsatz (Schutzart IP 65) entwickelter Netzanalysator, der für Lastanalysen, Energiemessungen, Rundsteueranalysen und für Störschreiberfunktionen in Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetzen vorgesehen ist.

Die Erfassung der Spannungen erfolgt über Spannungsmesskanäle, die für maximal 690 V AC (980V DC) bezogen auf Leiter-Leiter Spannungen ausgelegt sind. Die Leiterströme werden in Abhängigkeit des Strombetrages über Rogowskispulen oder Ministromzangen erfasst. Für die Messdaten steht eine maximale Speicherkapazität von 2 G-Byte mittels SD-Karte zur Verfügung. Über eine USB-Schnittstelle können die aufgezeichneten Daten mittels der mitgelieferten Software „WinPQ mobil“ ausgelesen und auf einen PC gespeichert werden.

Die PQ-Box 100 erfüllt die Anforderungsklasse A der Norm EN 61000-4-30, welche die Verfahren - siehe auch Punkt 4 - zur Messung der Spannungsqualität beschreibt.

Die Software bietet vielfältige Auswertehilfen, wie die Darstellung von Pegel-Zeitdiagrammen zyklischer Werte für Spannung, Strom, Leistung und Energie an. Weiter können PQ-Ereignisse in tabellarischer Form angezeigt werden. Die Darstellung verschiedener Berichte, wie z.B., die des Normberichts nach EN 50160 ist ebenfalls möglich. Weitere detaillierte technische Daten der PQ-Box 100 können der Anlage 2 entnommen werden.



Abbildung 5-20 - Übersicht PQ-Box 100⁵³

⁵³ Vgl. ([35], S. 17)

5.3 Aufbau der Messungen

5.3.1 Messgeräteanschluss an der Niederspannung im 4-Leiter Drehstromnetz

Die PQ-Box 100 verfügt über einen siebenpoligen Steckeranschluss über die die Rogowskistromzangen mit den Stromeingangskanälen der PQ-Box verbunden werden. Die angeschlossenen Stromzangen werden vom Gerät automatisch erkannt. Hierrüber erfolgt die Erfassung der Leiterströme I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} und der Strom I_N des Neutralleiters. Die Stromzangen sind mit einem Pfeil versehen. Für positive Darstellung von Leistungen (Bezug), müssen die Pfeile vom Erzeuger zum Verbraucher zeigen.

Über die fünf Spannungsmessleitungen erfolgt der Anschluss der Leiterspannungen U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} , des Neutralleiters N und des Schutzleiters PE .

Die Spannungsversorgung des Messgerätes wird im 400V-Netz über die Leiter-Leiter-Spannung U_{L-L} oder Leiter-Erde-Spannung U_{L-N} realisiert.

Für die richtige Interpretation der Messwerte muss im Gerätesetup die Netzform „4-Leiternetz“ ausgewählt werden. Daraufhin stellt das Gerät die Netzparameter und die Triggereinstellung ein.

Die Bewertung der Spannungsqualität erfolgt im 4-Leiter Drehstromnetz zwischen Außenleiter und Neutralleiter.

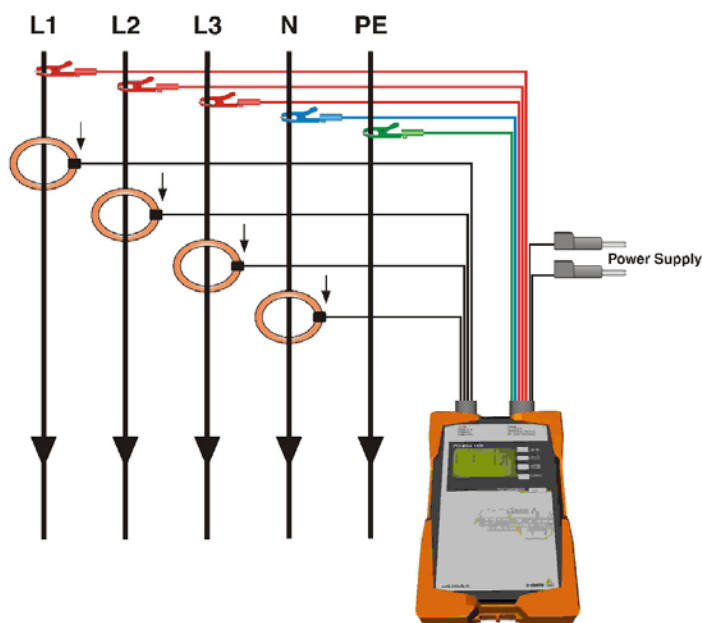


Abbildung 5-21 - Messaufbau in einem 4-Leiter Drehstromnetz⁵⁴

⁵⁴Vgl. ([34], S. 19)

5.3.2 Messgeräteanschluss an der Mittelspannung im 3-Leiter Drehstromnetz

Für die Erfassung der Leiterströme I_{L1} , I_{L2} , und I_{L3} werden in die Sekundärstromkreise der Stromwandler die dazugehörigen Stromzangen eingebunden.

Die Spannungen U_1 , U_2 , und U_3 werden ebenfalls sekundärseitig an den leiterbezogenen Spannungswandlern T15L1, T15L2 und T15L3 abgegriffen. Das Übersetzungsverhältnis der Spannungswandler beträgt $10/\sqrt{3} / 0,1/\sqrt{3}$ kV.

Für die richtige Darstellung und Interpretation müssen die zu messende Netzform 3-Leiternetz und die richtigen Übersetzungsverhältnisse der Strom- und Spannungswandler eingestellt werden.

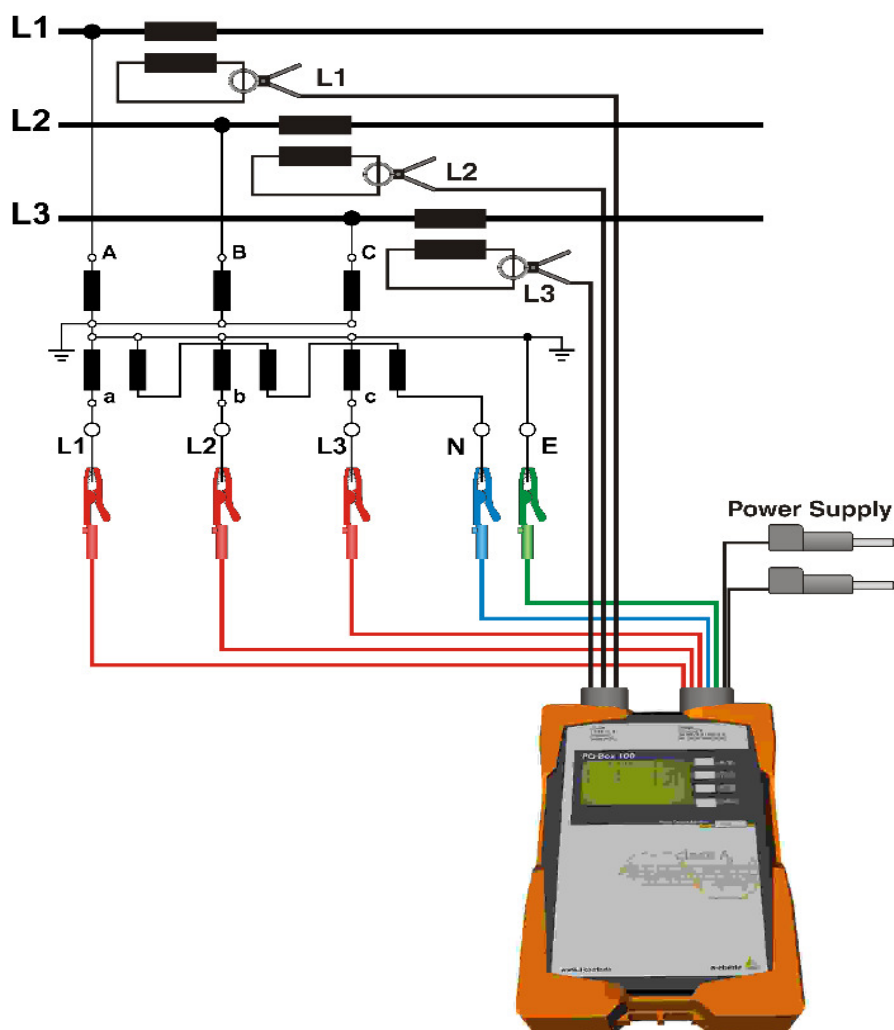


Abbildung 5-22 - Messaufbau in einem 3-Leiternetz mit Strom- und Spannungswandlern⁵⁵

⁵⁵ Vgl. ([36], S. 21)

5.3.3 Durchführung der Messungen

Es wurden insgesamt 18 Messungen synchron durchgeführt.

An allen Stationen wurden niederspannungsseitig, an der jeweiligen Hauptverteilung, die Messungen Nr. 1 bis 16 durchgeführt.

An der Mittelspannung erfolgten 2 Messungen. Nr. 14.1 und Nr. 16.1. Diese wurden an den Übergaben in den Stationen 14 und 16 installiert.

5.3.3.1 Zeitraum der Messungen

Alle Messungen wurden in dem Zeitraum vom 5. Mai 2014 00.00 Uhr bis 12. Mai 2014 00.00 Uhr, mit dem in der Abbildung 5-19 dargestellten Schaltzustand, durchgeführt.

5.4 Auswertung der Messungen

5.4.1 Vorgehensweise

Die einzelnen Messungen werden zunächst auf die in der EN 50160 festgelegten Grenzwerte und im weiteren auf Besonderheiten ausgewertet. In Abhängigkeit von Besonderheiten erfolgen separate Erläuterungen.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der durchgeführten Messungen, mit Bezug auf vergleichbare oder ähnliche charakteristische Merkmale.

Im Normbericht - siehe Beispiel Abbildung 5-23 - nach EN 50160 werden die relevanten Parameter Netzfrequenz, Ereignisse, Spannungsschwankungen, Gesamt Oberschwingungsgehalt (THD), Flickerstärke, Spannungsunsymmetrie und Harmonische als Balkendiagramm dargestellt. Mit der Farbe Rot gekennzeichnet sind die 95 %-Werte, mit Farbe Blau werden die höchsten 100 %- Werte angezeigt. Für die Einstellung aller Messgeräte gelten die Grenzwerte der EN 50160.

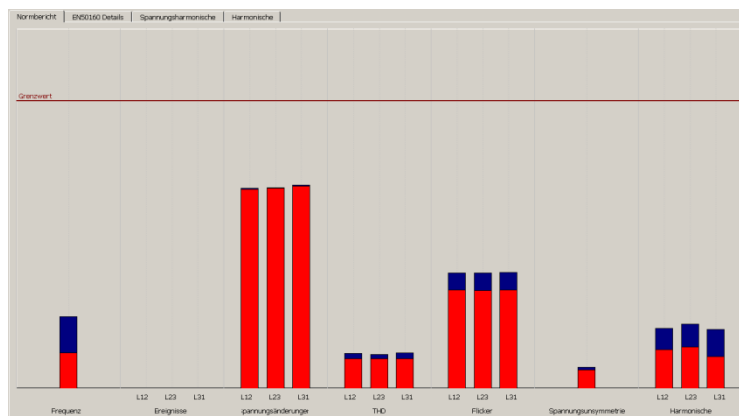


Abbildung 5-23 - Beispiel Normbericht

5.5 Messung 1 - Ortsnetzstation 1

Die vom Umspannwerk „ErY“ erste Ortsnetzstation versorgt über einen ölisierten Drehstromtransformator mit einer Nennscheinleistung von 400 kVA mit der Schaltgruppe Dyn5 das dazugehörige Niederspannungsnetz. Die Systemlänge des Mittelspannungssystems zwischen Umspannwerk und Ortsnetzstation beträgt 1,035 km. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,5/0,4 kV.

Über diese Station werden in unmittelbare Nähe eine Tankstelle sowie ein Gewerbegebiet versorgt. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-24 zeigt, dass alle zulässigen Grenzwerte der EN 50160 eingehalten wurden und damit die Spannungsqualität entsprechend dieser Norm im Messzeitraum gewährleistet war.

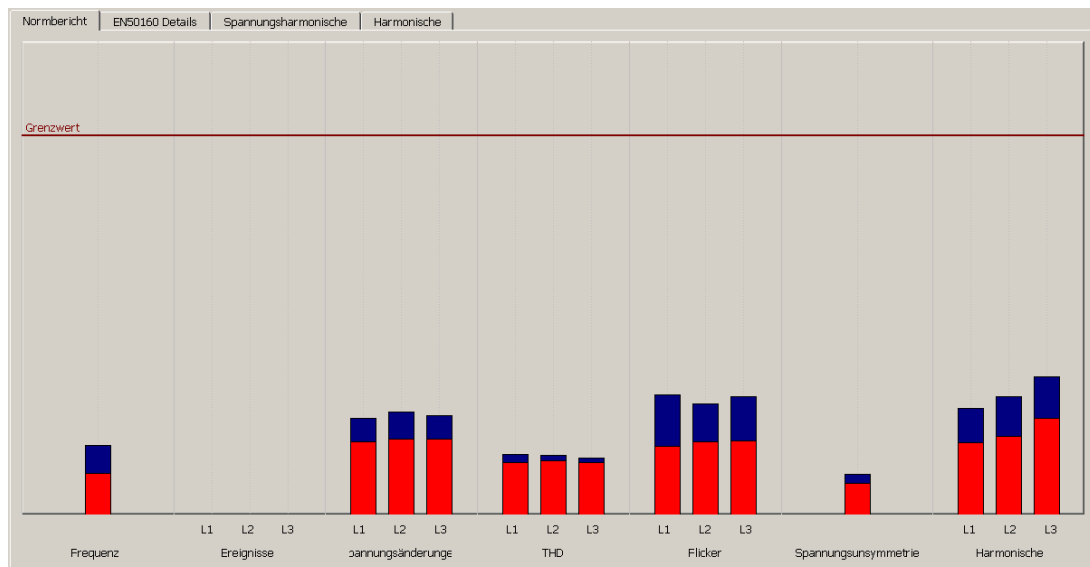


Abbildung 5-24 - Normbericht - Messung 1

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen:

$$U_{L1} = 232,89 \text{ V}; U_{L2} = 232,90 \text{ V und } U_{L3} = 232,99 \text{ V.}$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen:

$$U_{L1} = 224,15 \text{ V}; U_{L2} = 223,77 \text{ V und } U_{L3} = 223,95 \text{ V.}$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,22 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 7. Mai 2014 um 8.00 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betrugen zu diesem Zeitpunkt $I_{L1} = 101,5 \text{ A}$, $I_{L2} = 81,7 \text{ A}$ und $I_{L3} = 78,6 \text{ A}$.

Mit Hinblick auf die unsymmetrische Belastung der einzelnen Außenleiter wurde die Belastung des Neutralleiters untersucht. Durch diese nicht symmetrische Belastung der Außenleiter kommt es zu einer Phasenverschiebung in den Außenleitern und

folglich zu Nullströmen in der Grundschiwingung. Die relativ hohen Anteile der dritten und neunten Harmonischen Ströme, verursacht durch den Anschluss von Verbrauchern mit nichtlinearer Strom-Spannungscharakteristik, führen zu einer ungewöhnlichen hohen Belastung. In der folgenden Abbildung 5-24 ist der Wochenverlauf mit Neutrallerstrom, dem Nullstrom der Grundschiwingung sowie der 3. und 9. Harmonischen Nullströme dargestellt.

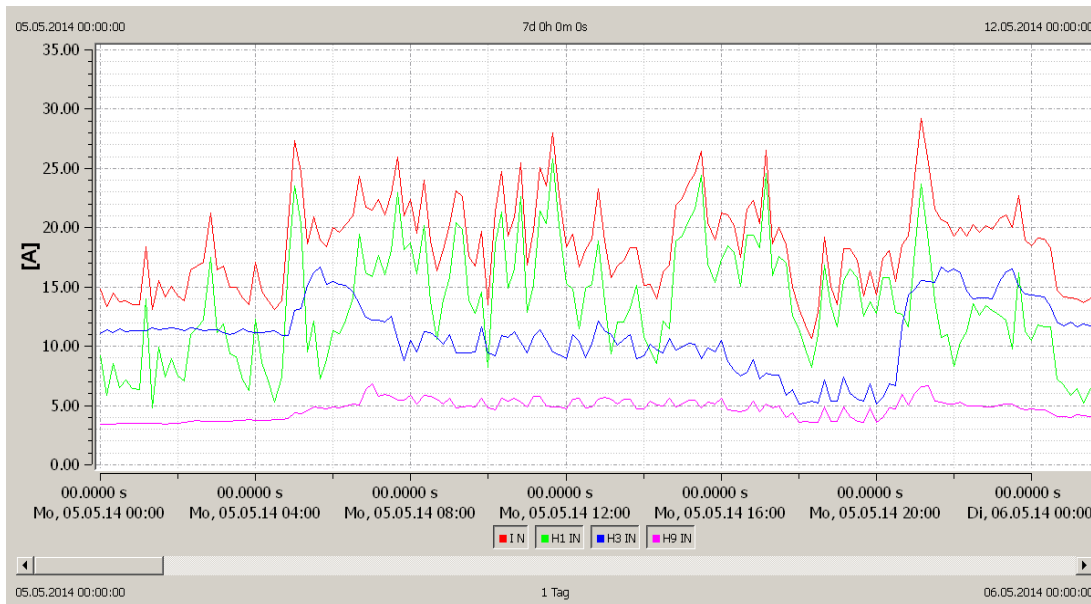


Abbildung 5-25 - Auswertung Tagesverlauf Neutrallerstrom, Nullstrom der Grundschiwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 1

Eher untypisch, ist der sich hier täglich wiederholende Verlauf der Wirk- und Blindleistung. Die Abbildung 5-24 zeigt, dass in der Zeit von 6.00 bis 8.00 Uhr und 21.00 Uhr bis 22.00 Uhr der Leistungsbedarf am höchsten ist. Dies kann auf das ohmsche-induktive Lastverhalten der Tankstelle zurückgeführt werden.

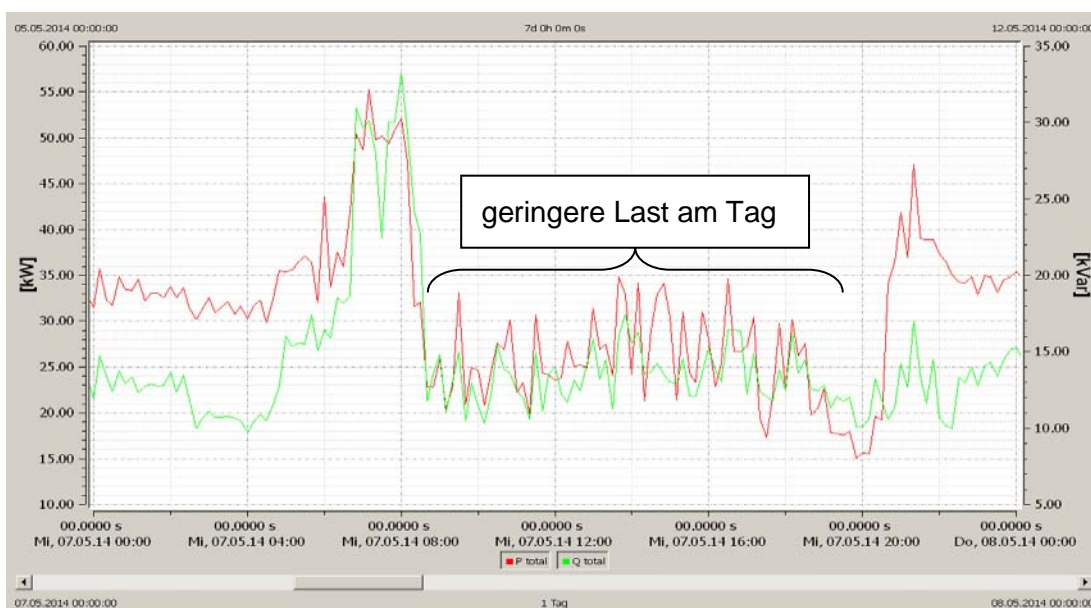


Abbildung 5-26 - Auswertung Tagesverlauf von Wirk- und Blindleistung P_{total} und Q_{total} - Messung 1

5.5.1 Erläuterungen zu Nullströmen im Neutralleiter

Ungerade Oberschwingungen treten in zunehmenden Maß in symmetrisch aufgebauten Niederspannungsnetzen auf.

Diese werden durch den vermehrten Einsatz von Gleichrichterschaltungen in Energiespar-, Leuchtstoff- oder Entladungslampen, Schaltnetzteilen, Schweißgeräten, USV-Anlagen und anderen elektronischen Verbrauchern verursacht.

Für die einzelnen Oberschwingungen besteht ein Zusammenhang zwischen der Ordnungszahl und der Phasenfolge. Mit der als positiv angenommenen Grundschwingung im Mitsystem werden die einzelnen Oberschwingungen in Mit-, Gegen- und Nullsystem unterteilt.

So werden mit $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ und den Beziehungen:

$3 \cdot k + 1$ z.B. die 7. Oberschwingung als Mitsystem (+),

$3 \cdot k + 2$ z.B. die 5. Oberschwingung als Gegensystem (-),

$3 \cdot k + 3$ z.B. die 3. Oberschwingung als Nullsystem (0)

bestimmt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen den symmetrischen Komponenten und der Ordnungszahl.

Symmetrische Komponenten	Mitsystem (+)	Gegensystem (-)	Nullsystem (0)
Ordnungszahl	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12

	$3 \cdot k + 1$	$3 \cdot k + 2$	$3 \cdot k + 3$
$k=0, 1, 2, 3 \dots$			

Tabelle 5-3 - Symmetrische Komponenten-Einordnung von Oberschwingungen

Der typische Aufbau eines Schaltnetzteiles ist in der Abbildung 5-27 dargestellt.

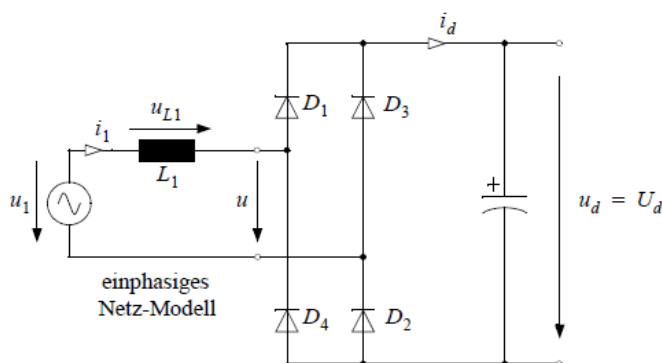


Abbildung 5-27 - Einphasiger Diodengleichrichter in Brückenschaltung mit kapazitiver Glättung⁵⁶

⁵⁶ Vgl. ([45], 2014)

Die Beeinflussung der Eingangsspannung durch den impulsförmigen Verlauf des Eingangsstromes eines solchen Schaltnetztes zeigt die Abbildung 5-28. Es ist zu erkennen, dass im Zeitbereich des Stromanstieges der Verlauf der sinusförmigen Wechselspannung beeinflusst wird.

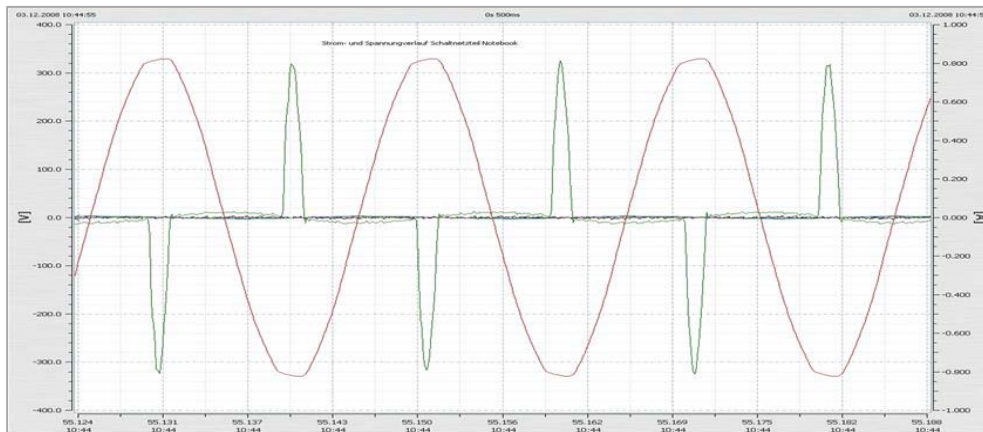


Abbildung 5-28 - Eingangsspannung und Eingangsstrom eines Schaltnetztes mit kapazitiver Glättung

In der dritten Harmonischen mit 150 Hz rotiert der Zeiger in dreifacher Geschwindigkeit mit Bezug auf die Rotationsgeschwindigkeit der Grundschwingung. Das bedeutet, bei 120 Grad der Grundschwingung hat die 3. Harmonische bereits eine Vollschwingung zurück gelegt. Da auch die Phasenverschiebung zwischen den Außenleitern 120 Grad beträgt, addieren sich die 3. Harmonischen der Leiter L1, L2 und L3 ohne Phasenverschiebung zu einem Nullsystem auf.

Die folgende Abbildung 5-29 zeigt diesen Verlauf qualitativ zur Demonstration.

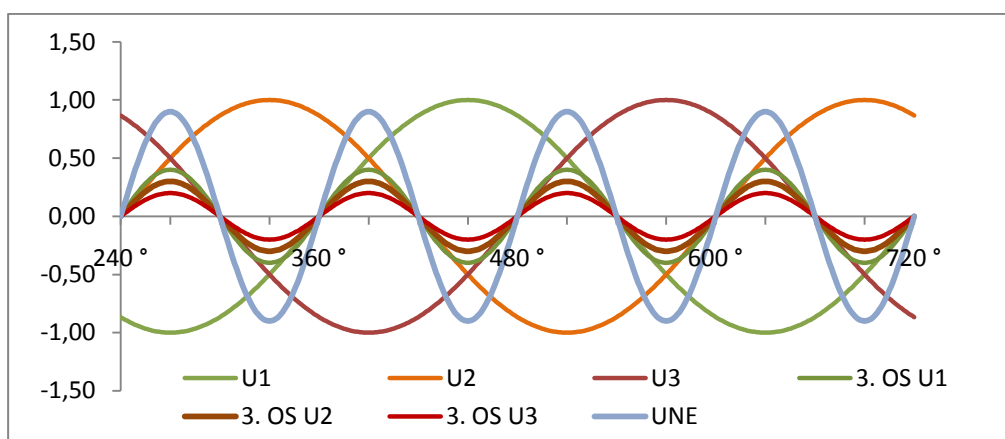


Abbildung 5-29 - Dreiphasensystem mit Grundschwingungen, 3. Harmonischen und Nullsystem der 3. Harmonischen

International gibt es bereits verschiedene Empfehlungen oder Bestimmungen den Neutralleiter höher zu dimensionieren. So haben, z.B. die Länder Finnland und Schweden neue Bestimmungen für die Dimensionierung von Neutralleitern auferlegt.⁵⁷

⁵⁷ Vgl. ([42], 2014)

5.6 Messung 2 - Ortsnetzstation 2

Die vom Umspannwerk „ErY“ nächste Ortsnetzstation ist mit einem ölisierten Drehstromtransformator Schaltgruppe Dyn5, der eine Nennscheinleistung von 400 kVA hat, ausgestattet. Die Länge des Mittelspannungssystems zwischen Umspannwerk und Ortsnetzstation 2 beträgt 1,825 km. Das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist 10,4/0,42 kV.

Die Station befindet sich in dem gleichen Gewerbegebiet wie Ortsnetzstation 1. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-30 zeigt die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte der EN 50160 und damit die Gewährleistung der Spannungsqualität über den gesamten Messzeitraum.

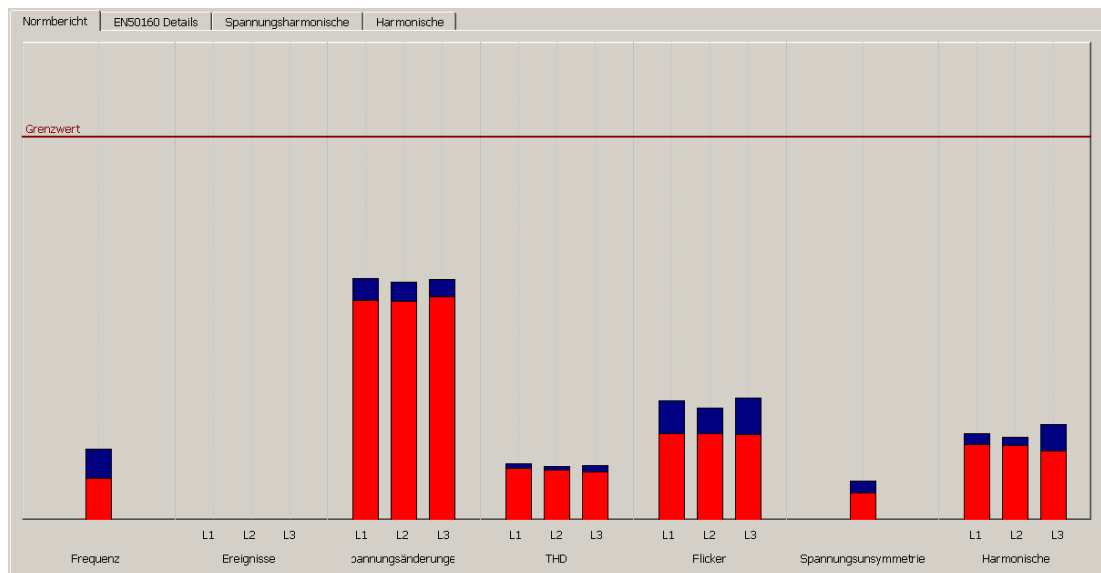


Abbildung 5-30 - Normbericht - Messung 2

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 244,54 \text{ V}, U_{L2} = 244,34 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 244,48 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 234,95 \text{ V}, U_{L2} = 234,82 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 235,35 \text{ V}.$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,21 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 6. Mai 2014 um 16.20 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 135,7 \text{ A}$, $I_{L2} = 115,0 \text{ A}$ und $I_{L3} = 118,8 \text{ A}$.

Die hohen Effektivwerte der Leiterspannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} sind auf das eingestellte Übersetzungsverhältnis des Transformators zurück zu führen. An der Niederspannungsverteilung sind zwei PV-Anlagen mit einer Wirkleistung von 48 kW

und 53 kW angeschlossen. Diese haben einen sehr geringen Einfluss auf die Spannungsverhältnisse an der Niederspannungsseite des Transformators.

Die folgende Abbildung 5-31 zeigt den Spannungs- und Leistungsverlauf des Leiters L1 am Sonntag dem 11. Mai 2014. Auch bei positiver Wirkleistung - Bezug - wird ein effektiver Spannungswert in Leiter L1 von 243,8 V erreicht.

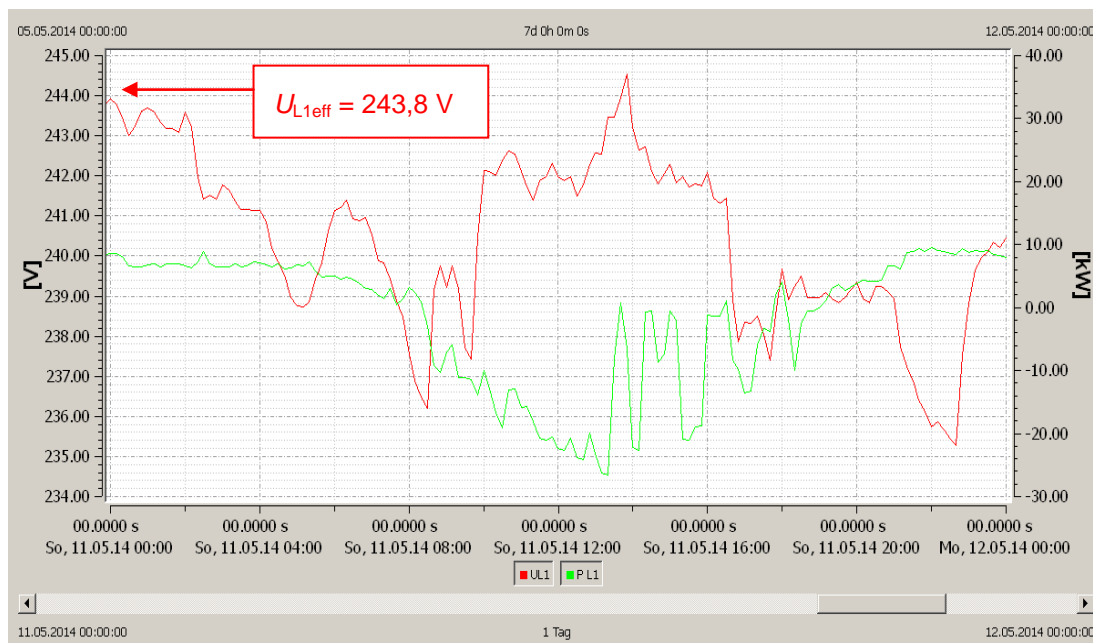


Abbildung 5-31 - Auswertung Tagesverlauf von Spannung und Wirkleistung in Leiter 1 - Messung 2

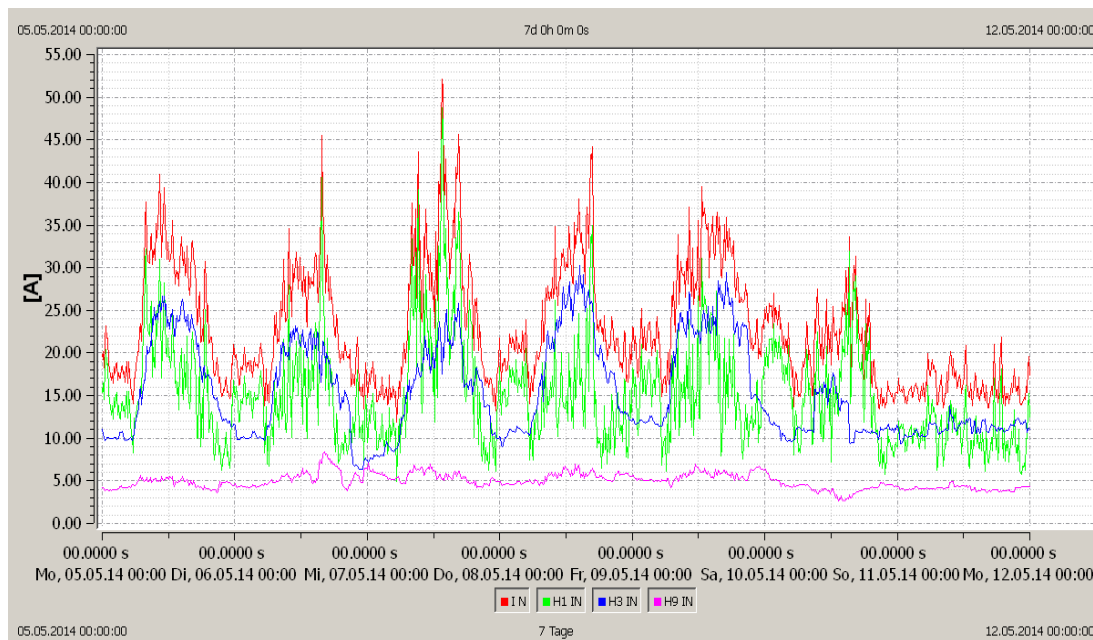


Abbildung 5-32 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 2

Auch bei dieser Messung wurde mit Hinblick auf die Unsymmetrie der einzelnen Außenleiter die Belastung des Neutralleiters untersucht.

Wie in Messung 1 führen die unsymmetrische Belastung und die relativ hohen Anteile der dritten und neunten Harmonischen Ströme, an allen Tagen, außer am Sonntag, in der Zeit von 7.00 bis 20.00 Uhr zu einer höheren Neutralleiterbelastung. Die Abbildung 5-32 zeigt den Wochenverlauf mit Neutralleiterstrom, den Nullstrom der Grundschwingung und die 3. und 9. Harmonischen Nullströme.

5.7 Messung 3 - Ortsnetzstation 3

Die Systemlänge der Mittelspannung zwischen Umspannwerk und Ortsnetzstation 3 beträgt 2,12 km. Sie wird ebenfalls mit einem ölisierten Drehstromtransformator Schaltgruppe Dyn5, der eine Nennscheinleistung von 400 kVA besitzt, betrieben. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Auch diese Station versorgt ein Gewerbegebiet. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-33 zeigt, dass alle zulässigen Grenzwerte der EN 50160 eingehalten wurden und damit die Spannungsqualität entsprechend dieser Norm gewährleistet war.

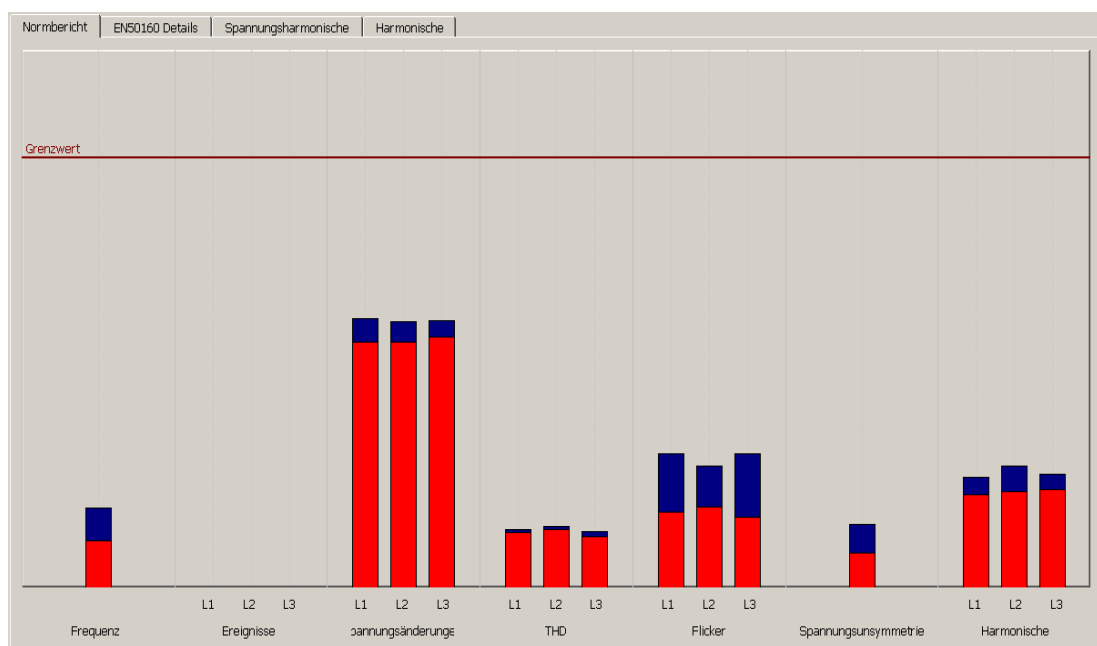


Abbildung 5-33 - Normbericht - Messung 3

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 244,39 \text{ V}, U_{L2} = 244,22 \text{ V und } U_{L3} = 244,32 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 235,16 \text{ V}, U_{L2} = 234,90 \text{ V und } U_{L3} = 235,23 \text{ V}.$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,29 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 7. Mai 2014 um 7.30 Uhr in Leiter 3 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betrugen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 37,2 \text{ A}$, $I_{L2} = 39,9 \text{ A}$ und $I_{L3} = 47,9 \text{ A}$.

Wie in Messung 2 sind die hohen Effektivwerte der Leiterspannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} auf das eingestellte Übersetzungsverhältnis des Transformators zurück zu führen. Die niedrige Auslastung sowie die geringe Distanz mit den damit verbundenen geringen Kabelimpedanzen zur Ortsnetzstation 2 ergeben die fast identischen Spannungswerte an beiden Ortsnetzstationen.

Auch in dieser Ortsnetzstation führen die unsymmetrische Belastung und die relativ hohen Anteile der dritten und neunten Harmonischen Ströme, zu einer höheren Neutralleiterbelastung über den gesamten Messzeitraum. Ausgenommen davon ist der Sonntag, in der Zeit von 7.00 bis 20.00 Uhr. Die folgende Abbildung 5-34 zeigt den gesamten Wochenverlauf von Montag bis Freitag. Zu erkennen sind hohe Werte im Neutralleiterstrom. Diese sind auf den Nullstrom der Grundschwingung sowie auf die Nullströme die 3. und 9. Harmonischen zurück zu führen.

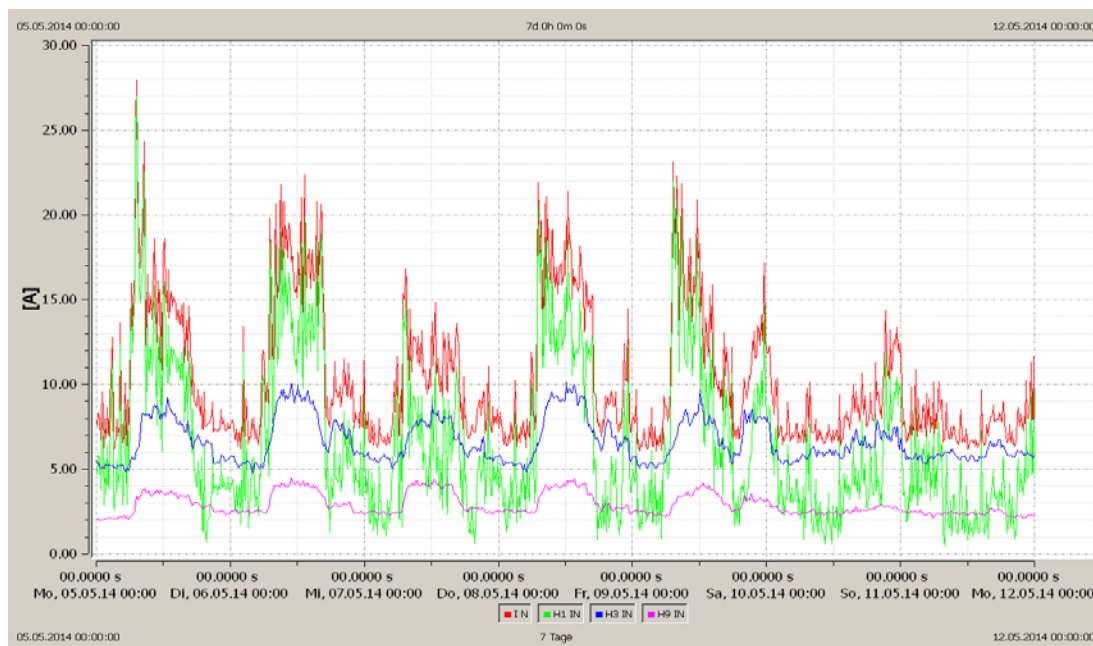


Abbildung 5-34 - Auswertung Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie 3. und 9. Harmonische Nullströme - Messung 3

5.8 Messung 4 - Ortsnetzstation 4

Die Ortsnetzstation 4 wird über eine Systemlänge von 2,63 km vom Umspannwerk „ErY“ versorgt. Sie ist mit einem 630 kVA ölisierten Drehstromtransformator Schaltgruppe Dyn5 ausgestattet. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Diese Station versorgt ein Bürogebäude. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-35 zeigt, keine Verletzung der zulässigen Grenzwerte nach EN 50160 über den gesamten gemessenen Zeitraum.

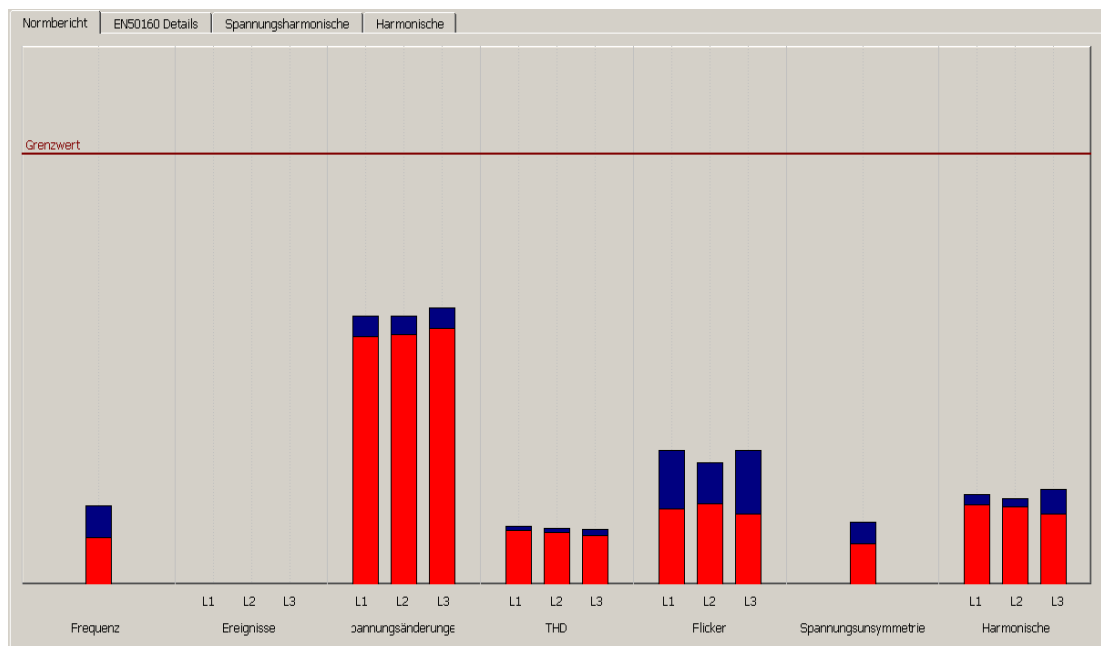


Abbildung 5-35 - Normbericht - Messung 4

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:
 $U_{L1} = 244,36 \text{ V}$, $U_{L2} = 244,36 \text{ V}$ und $U_{L3} = 244,76 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:
 $U_{L1} = 235,16 \text{ V}$, $U_{L2} = 235,16 \text{ V}$ und $U_{L3} = 235,75 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,29 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 9. Mai 2014 um 14.20 Uhr in Leiter L3 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für $I_{L1} = 11,7 \text{ A}$, $I_{L2} = 20,9 \text{ A}$ und $I_{L3} = 43,4 \text{ A}$.

Bei dieser Messung sind die hohen Effektivwerte der Leiterspannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} auf das eingestellte Übersetzungsverhältnis des Transformators zurück zu führen. Die Auslastung de Ortsnetztransformators ist mit 3,59 % im Maximum sehr gering.

In dieser Ortsnetzstation ist, gemessen an der Grundausslastung, eine erhöhte unsymmetrische Belastung festzustellen. In der folgenden Abbildung 5-36 ist der Wochenverlauf der Leiterströme I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} und der Neutralleiterstrom I_N dargestellt.

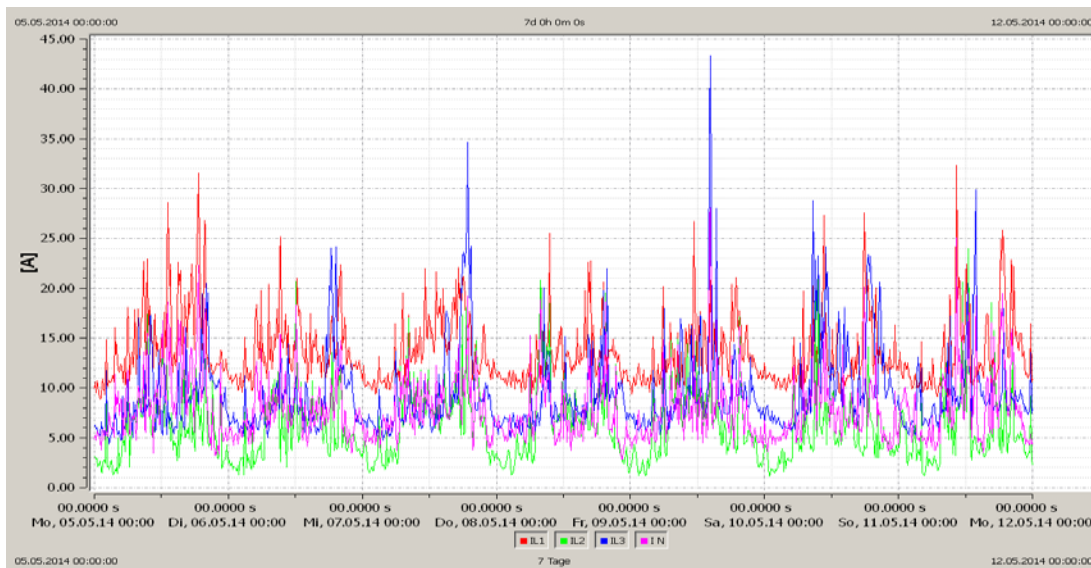


Abbildung 5-36 - Auswertung Wochenverlauf Leiterströme von L1, L2, L3 und Neutralleiterstrom - Messung 4

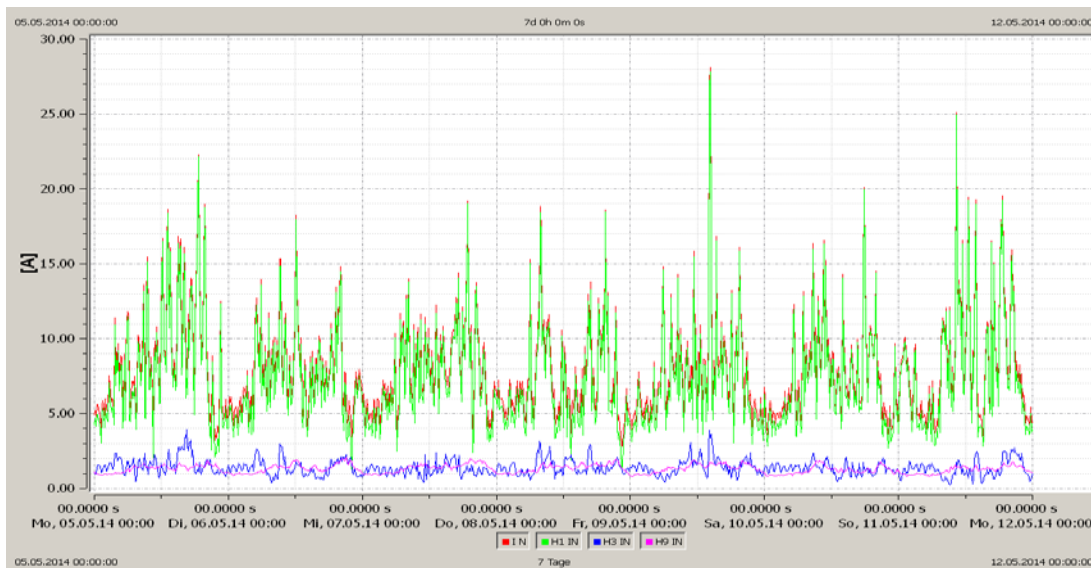


Abbildung 5-37 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 4

Typischerweise treten in Bürogebäuden aufgrund der eingesetzten Bürotechnik (PC, Drucker, Scanner usw.) höhere durch drei teilbare harmonische Ströme auf, welche sich in der Höhe des Neutralleiterstromes äußern. Referenzmessungen haben ergeben, dass an anderen Bürokomplexen eine starke Neutralleiterbelastung Wochentags von ca. 7.00 Uhr bis 18.00 Uhr auftritt. Diese Eigenschaft ist bei dieser Messung - siehe Abbildung 5-37 - nicht zu erkennen, da hier der Neutralleiterstrom fast ausschließlich vom Nullstrom der Grundschwingung geprägt wird. Dies liegt daran, dass das Bürogebäude zum Zeitraum der Messung sehr gering belegt war.

5.9 Messung 5 - Ortsnetzstation 5

Die Systemlänge der Mittelspannung zwischen dem Umspannwerk „ErY“ und der Ortsnetzstation 5 beträgt insgesamt 4,33 km. Der ölisierte Drehstromtransformator Schaltgruppe Dyn5 hat eine Nennscheinleistung von 630 kVA. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Diese Station versorgt ein Wohngebiet und einen kleinen Gewerbebereich. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-38 zeigt die Einhaltung der Spannungsqualität nach EN 50160 über den gesamten Messzeitraum.

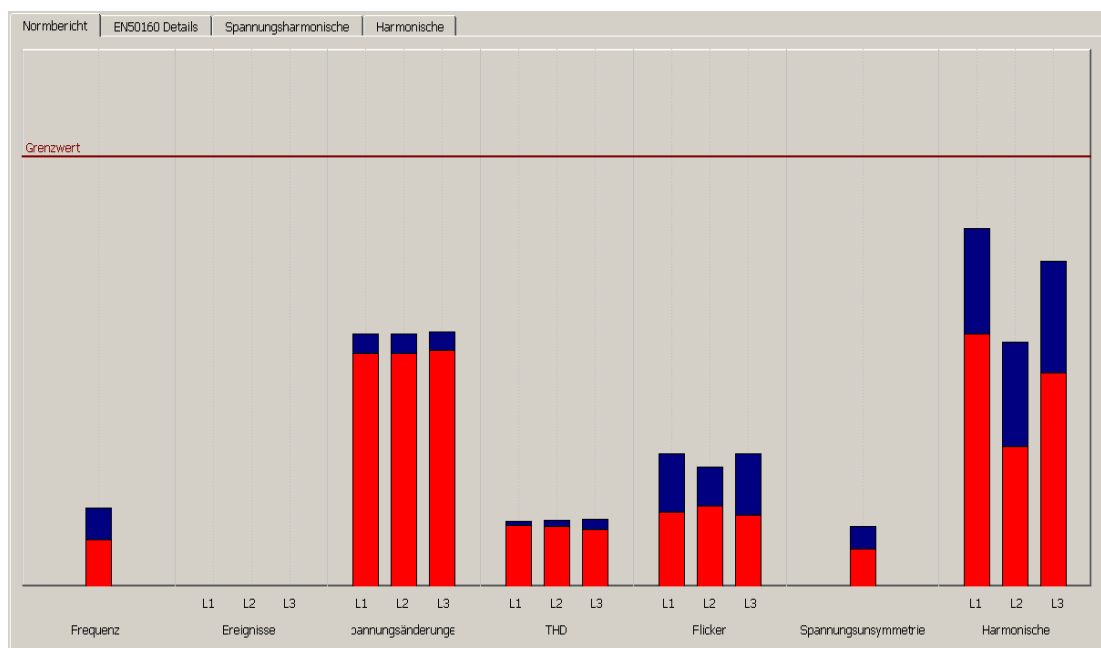


Abbildung 5-38 - Normbericht - Messung 5

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:
 $U_{L1} = 243,52 \text{ V}$, $U_{L2} = 243,54 \text{ V}$ und $U_{L3} = 243,62 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:
 $U_{L1} = 234,04 \text{ V}$, $U_{L2} = 233,86 \text{ V}$ und $U_{L3} = 234,44 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,28 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 7. Mai 2014 um 14.40 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für:
 $I_{L1} = 129,6 \text{ A}$, $I_{L2} = 127,98 \text{ A}$ und $I_{L3} = 109,79 \text{ A}$.

Die geringe Auslastung dieses Mittelspannungsabschnittes, d.h. vom Umspannwerk bis hin zu dieser Ortsnetzstation und die geringe Auslastung der Ortsnetzstation selber, führen zu den weiterhin hohen Effektivwerten der Leiterspannungen

U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} . Die folgende Abbildung 5-39 zeigt die Auslastung mit den Leiterströmen I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} und dem Neutralleiterstrom I_N der durchgeführten Messung.

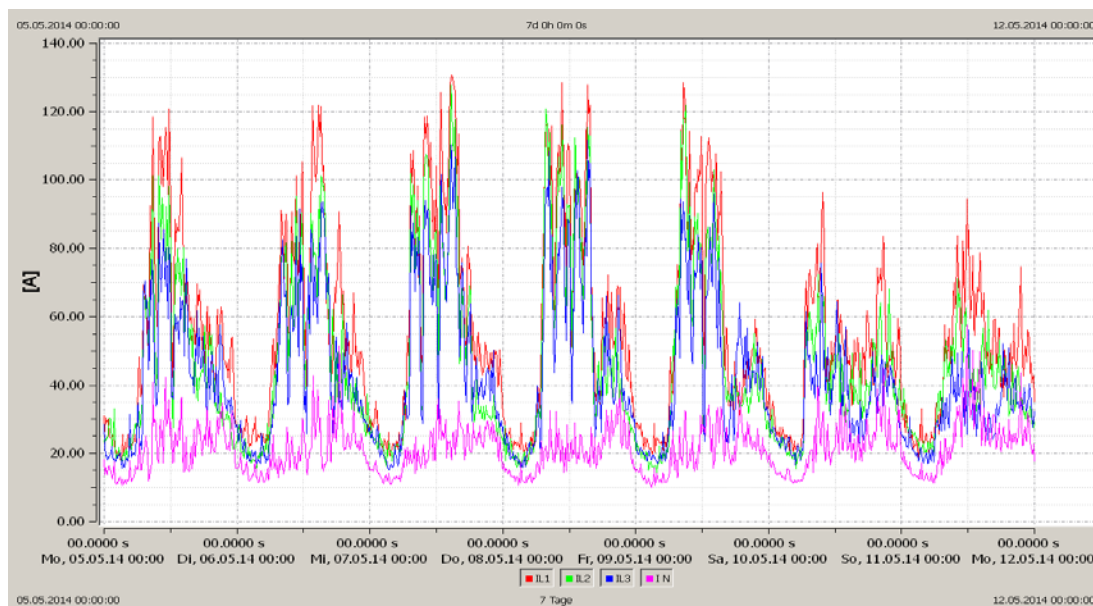


Abbildung 5-39 - Auswertung Wochenverlauf Leiterströme von L1, L2, L3 und Neutralleiterstrom - Messung 5

Über den gesamten Wochenverlauf ist ein erhöhter Anteil der 3. Harmonischen festzustellen. Siehe Abbildung 5-40. Darüber hinaus fällt über den Zeitraum vom 5. Mai bis 10. Mai (Montag bis Freitag) ein erhöhter Anteil des 27. Harmonischen Stromes auf. Dieser über jeden Wochentag verteilte - 7.00 Uhr bis 17.00 Uhr - verhältnismäßig hohe Anteil ist auf eine Resonanz zurück zu führen. Es ist davon auszugehen, dass im oben genannten Zeitraum die Netzverhältnisse (L-C-R-Anteil) eine Reihenresonanz der 27. Harmonischen zulassen.

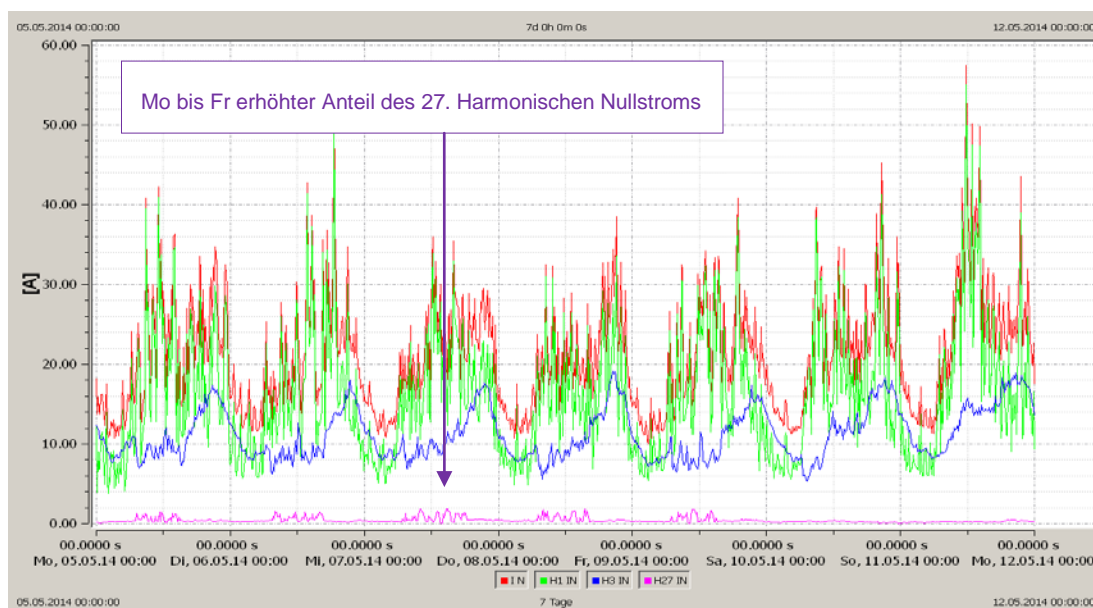


Abbildung 5-40 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie die 3. und 27. Harmonischen Nullströme - Messung 5

5.10 Messung 6 - Ortnetzstation 6

Die Ortsnetzstation 6 wird vom Umspannwerk „ErY“ über eine Gesamtsystemlänge von 4,66 km versorgt. Der ölisierte Drehstromtransformator hat eine Nennscheinleistung von 400 kVA. Die Schaltgruppe ist Dyn5. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Diese Station versorgt ein Wohngebiet. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-41 zeigt die Gewährleistung der Spannungsqualität nach EN 50160 über den gesamten Zeitraum.

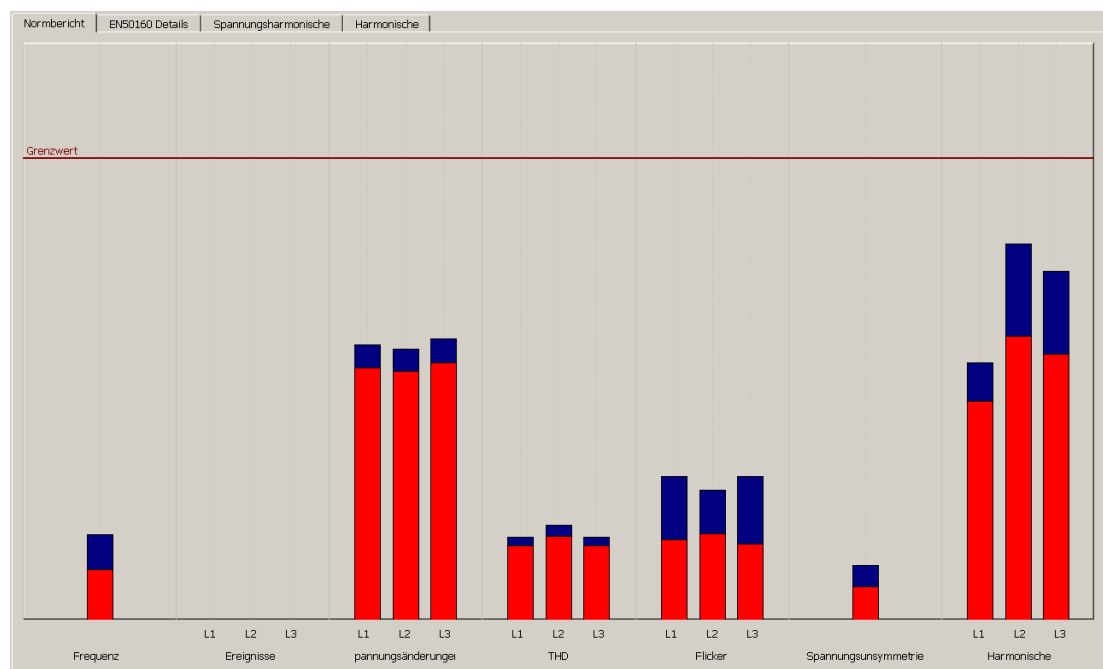


Abbildung 5-41 - Normbericht - Messung 6

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:
 $U_{L1} = 243,72 \text{ V}$, $U_{L2} = 243,48 \text{ V}$ und $U_{L3} = 244,31 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:
 $U_{L1} = 234,53 \text{ V}$, $U_{L2} = 234,17 \text{ V}$ und $U_{L3} = 234,81 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,24 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 8. Mai 2014 um 20.50 Uhr in Leiter L2 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für $I_{L1} = 101,1 \text{ A}$, $I_{L2} = 125,9 \text{ A}$ und $I_{L3} = 110,2 \text{ A}$.

Die beiden folgenden Abbildungen 5-42 und 5-43 zeigen das typische unterschiedliche Verbraucherverhalten in einem größeren Wohngebäude an einem Wochentag bzw. an einem Sonntag.

Während regelmäßig wiederholend in den Wochentagen zwischen 17.00 Uhr und 22.00 Uhr ein erhöhter Leistungsbedarf besteht, ist der Leistungsbedarf am Sonntag gegen 12.00 Uhr am höchsten. Das Verbraucherverhalten zwischen 17.00 Uhr und 22.00 Uhr entspricht nahezu dem der Wochentage.

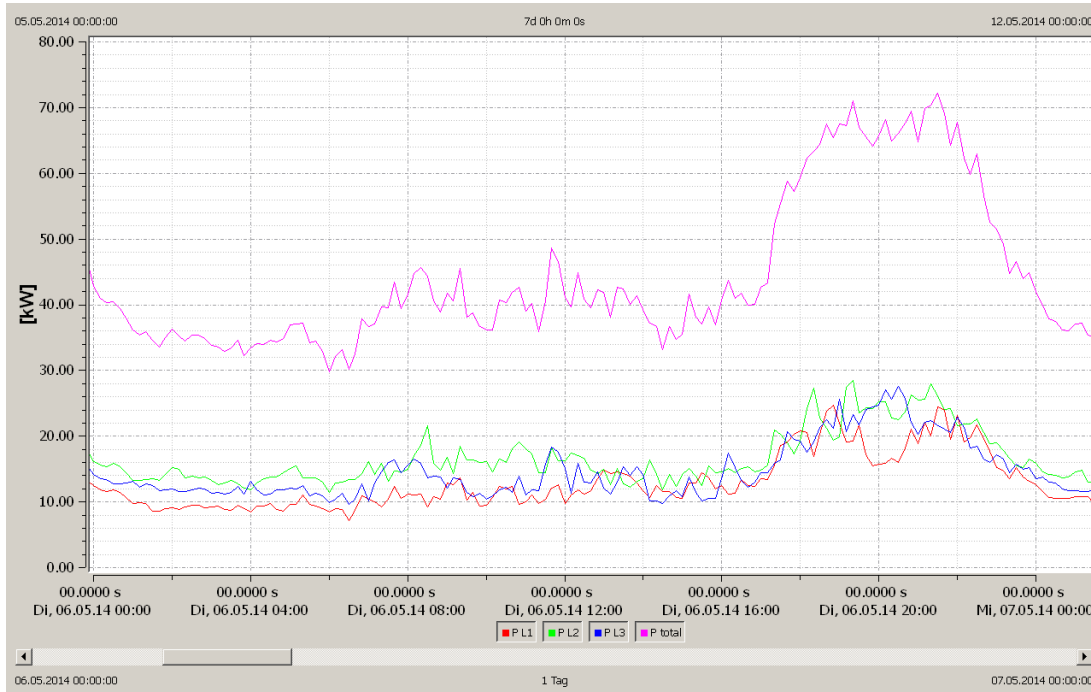


Abbildung 5-42 - Auswertung Tagesverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} am Dienstag 6. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr - Messung 6

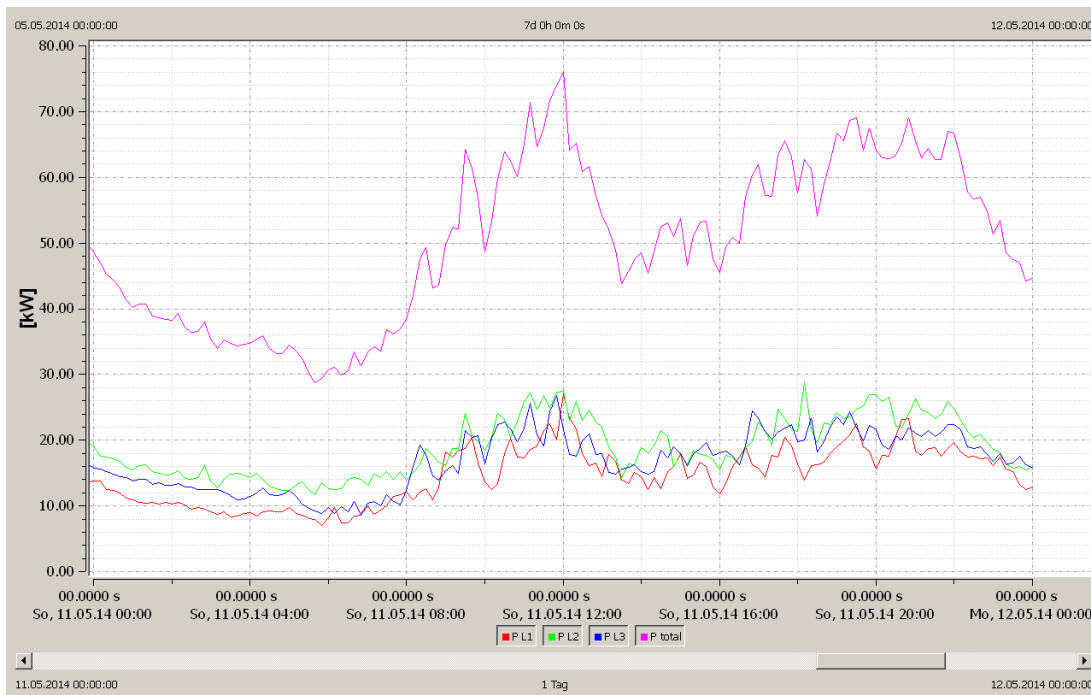


Abbildung 5-43 - Auswertung Tagesverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} am Sonntag 11. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr - Messung 6

5.11 Messung 7 - Ortsnetzstation 7

Die Gesamtsystemlänge zwischen dem Umspannwerk „ErY“ und der Ortsnetzstation 7 beträgt 4,88 km. Sie ist mit einem ölisierten Drehstromtransformator der über eine Nennscheinleistung von 400 kVA verfügt, ausgestattet. Die Schaltgruppe ist Dyn5. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Diese Station versorgt ein Wohngebiet. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-44 zeigt, die Gewährleistung der Spannungsqualität nach EN 50160 über den gesamten Zeitraum.

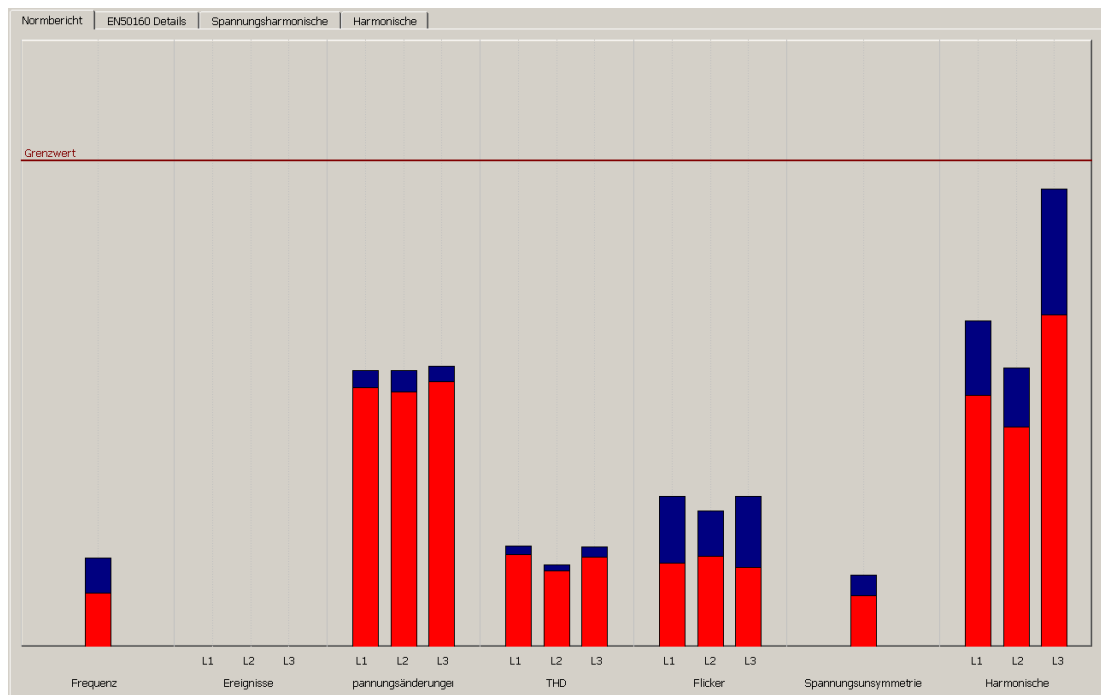


Abbildung 5-44 - Normbericht - Messung 7

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 243,08 \text{ V}, U_{L2} = 243,11 \text{ V und } U_{L3} = 243,29 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 233,57 \text{ V}, U_{L2} = 233,38 \text{ V und } U_{L3} = 234,08 \text{ V}.$$

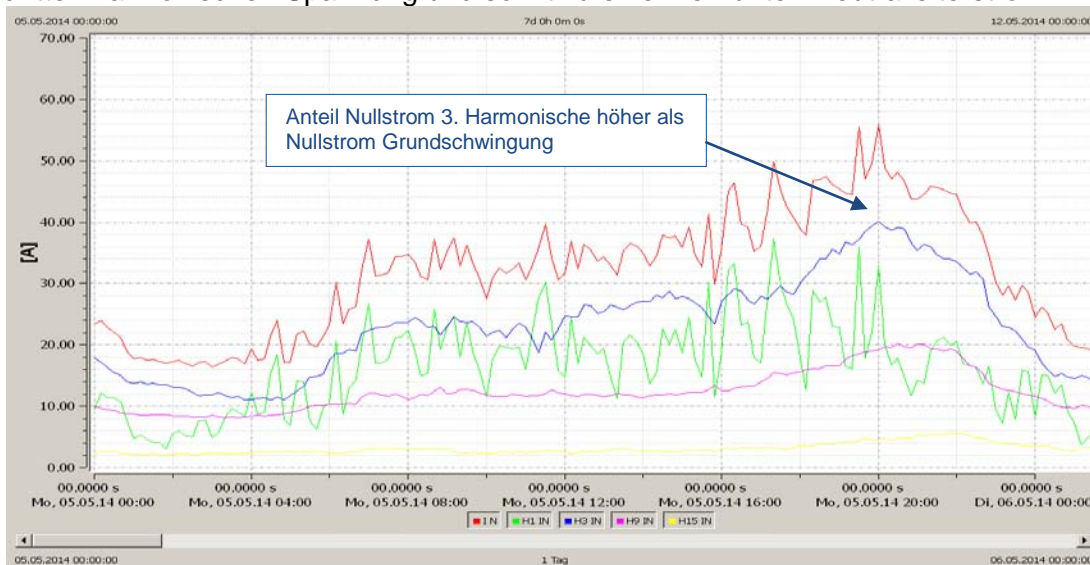
Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,30 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 8. Mai 2014 um 19.20 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für $I_{L1} = 227,9 \text{ A}$, $I_{L2} = 203,2 \text{ A}$ und $I_{L3} = 195,4 \text{ A}$.

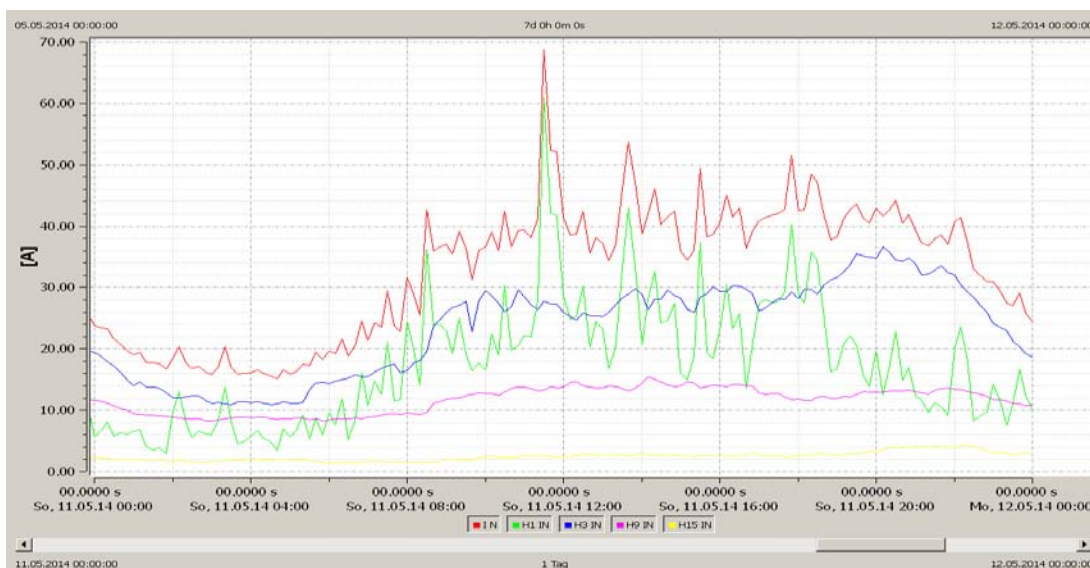
Der Normbericht der Messung 7 zeigt einen weiteren Anstieg der Harmonischen Spannungen und Ströme. Dieser Anstieg wurde bereits in der Messung 6 erkannt.

In den folgenden Abbildungen 5-44 und 5-45 wird der Tagesverlauf eines Wochentages und eines Sonntags von verschiedenen Nullströmen miteinander verglichen.

An den Wochentagen ist der Nullstrom der dritten Harmonischen in der Zeit von ca. 18.00 Uhr bis ca. 23.00 Uhr teilweise höher als der Nullstrom der Grundschwingung. Siehe Abbildung 5-45. Dieses Verhalten ist auch am Sonntag - siehe Abbildung 5-46 - in den Schwachlastzeiten zu beobachten. Das beruht auf der Tatsache, dass im oben genannten Zeitraum vermehrt Geräte mit Schaltnetzteilen mit kapazitiver Glättung (PC, TV) betrieben werden. Dieses Phänomen wird in der Literatur als Fernsehspitze bezeichnet. Wie bereits in Messung 1 erläutert führt der Einsatz von Schaltnetzteilen zu einer Erhöhung der dritten harmonischen Spannung und somit zu einem erhöhten Neutralleiterstrom.



**Abbildung 5-45 - Auswertung Tagesverlauf am Montag 5. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr
Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie 3., 9. und 15. Harmonischen Nullströme - Messung 7**



**Abbildung 5-46 - Auswertung Tagesverlauf am Sonntag 11. Mai 2014 0.00 - 24.00 Uhr
Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie 3., 9. und 15. Harmonischen Ströme - Messung 7**

5.12 Messung 8 - Ortnetzstation 8

Die Gesamtsystemlänge zwischen dem Umspannwerk „ErY“ und der Ortsnetzstation 8 beträgt 5,08 km. In dieser Ortsnetzstation befindet sich die Trennstelle der Mittelspannung. Die Ortsnetzstation ist mit einem 400 kVA ölisierten Drehstromtransformator - Schaltgruppe Dyn5 - ausgestattet. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Diese Station versorgt ein Wohngebiet. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-47 zeigt erstmals eine Grenzwertverletzung der Spannungsqualität nach EN 50160. Die Werte der effektiven Leiter-Erde-Spannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} sowie die Spannungsunsymmetrie sind nahezu identisch mit den Werten der Messung 7.

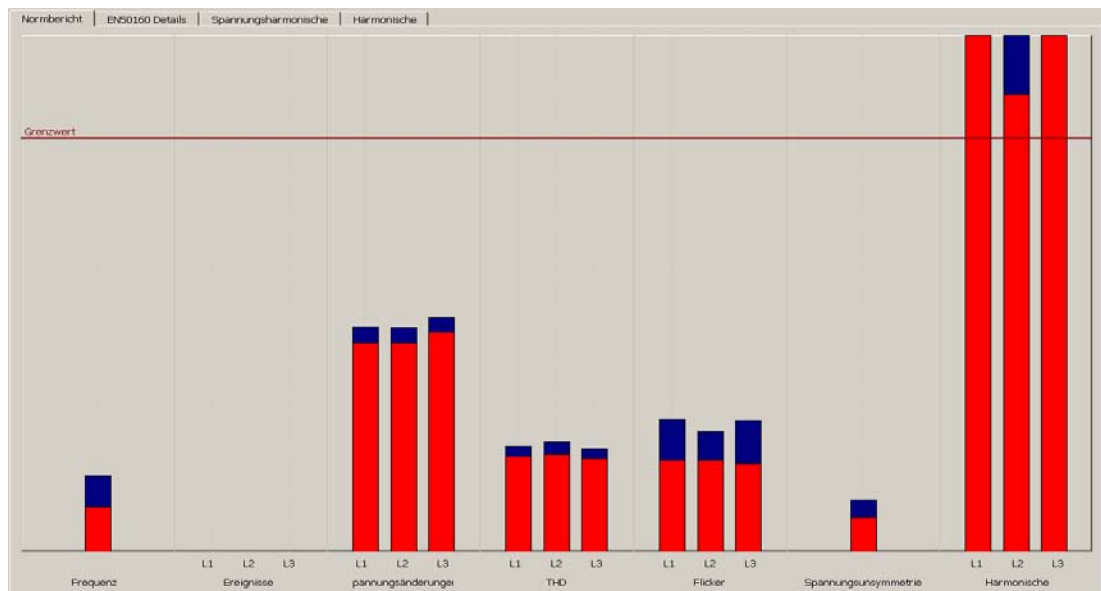


Abbildung 5-47 - Normbericht - Messung 8

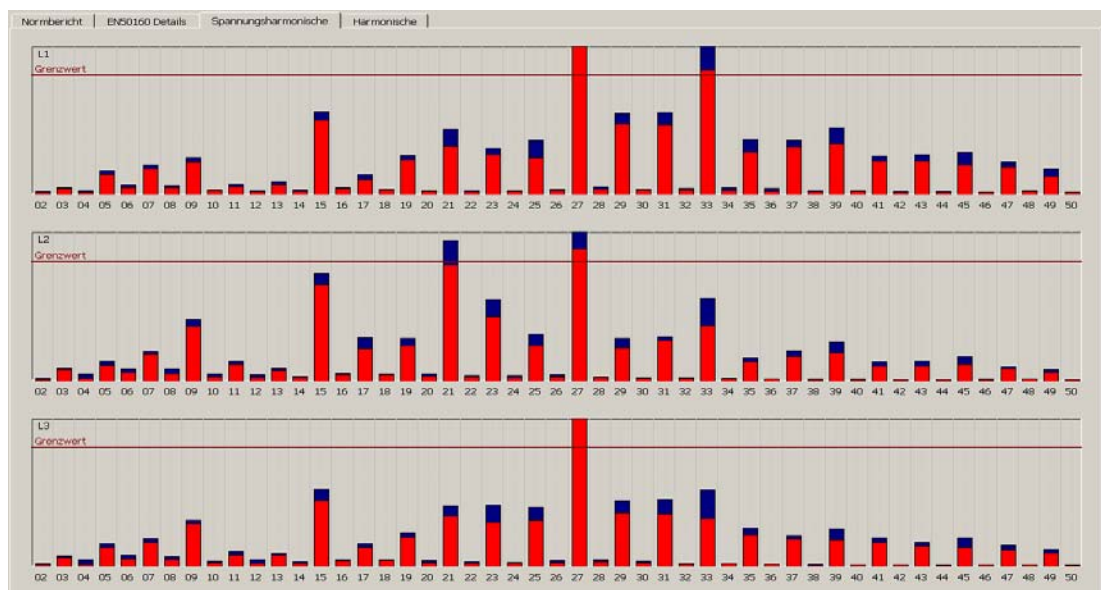


Abbildung 5-48 - Spektrum 2. bis 50. Harmonische Spannungen - Messung 8

Nicht eingehalten wurden - siehe Abbildung 5-48 - die Grenzwerte der 21. Harmonischen Spannung in Leiter L2, der 27. Harmonischen Spannungen in allen drei Leitern und die 33. Harmonische Spannung in Leiter L1.

Die Grenzwertverletzungen im hochfrequenten harmonischen Spannungsbereich sind die Folge von diversen Resonanzstellen. Die Art der Resonanz (Reihen- oder Parallelresonanz) kann hier nicht bestimmt werden und ist nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit. Zur Bestimmung der Resonanzstellen wäre eine Impedanz-Frequenz-Charakteristik erforderlich.

Die durchgeführten Messungen 6 bis 8 erfolgten in Ortsnetzstationen, in denen auf den ersten Blick ähnliche Versorgungsstrukturen vorzufinden sind. Es handelt sich hierbei jeweils um Einbaustationen in elfgeschossigen Wohngebäuden, in denen eine Ortsnetzstation typischerweise jeweils ein Wohngebäude versorgt. Allerdings versorgt die Ortsnetzstation 8 zusätzlich noch einen Schwimm- und Saunabereich.

In allen drei Messungen können ähnliche Merkmale hinsichtlich der Spannungsqualität festgestellt werden. Bereits in Messung 6 treten erhöhte Werte bei den Harmonischen Spannungen auf, die in Messung 7 weiter ansteigen und deren Grenzwerte in Messung 8 erstmals überschritten werden.

Ursache für die Grenzwertverletzungen der Oberschwingungsspannungen in Messung 8 sind offensichtlich Resonanzen die durch die Netzstruktur des Wohngebäudes in Zusammenhang mit der Versorgung des Schwimm- und Saunabereiches entstehen.

Das folgende vereinfachte Netzersatzschaltbild - siehe Abbildung 5-49 - zeigt die prinzipielle Struktur dieses Versorgungssystems. Ausgehend von den überschwingungserzeugenden Lasten sind einige ohmsche induktive Verbraucher angeschlossen. Für den Betrieb der Schwimmbereiche werden Motoren, deren Blindleistung mit Kondensatoren kompensiert wird, betrieben.

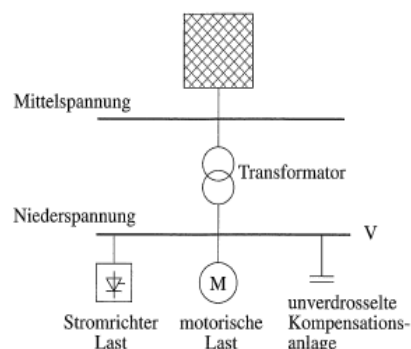


Abbildung 5-49 - Netzersatzschaltbild Versorgungsstruktur⁵⁸

⁵⁸ Vgl. ([43], S. 83)

Im Mitsystem betrachtet, siehe Abbildung 5-50, bilden die induktive Einspeisung und die kapazitive Blindstromkompensation bzw. Kabelkapazitäten aus Sicht des Oberschwingungserzeugers am Verknüpfungspunkt ein Parallelschwingkreis.⁵⁹ Dieser wird durch die Ohmschen Anteile der Einspeisung und der Lasten bedämpft.

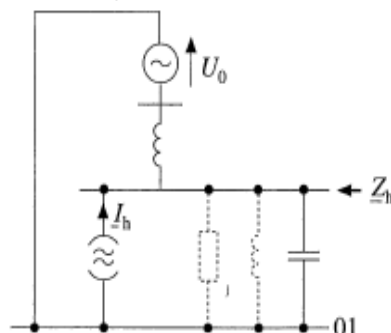


Abbildung 5-50 - Ersatzschaltbild im Mitsystem des Versorgungsnetzes⁶⁰

Die Berechnung der Resonanzfrequenz kann mit der Scheinleistung des Transformators S_r , der Kurzschlussspannung U_k und der Bemessungsleistung für die Kondensatoren Q_c mit folgender Formel bestimmt werden:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\frac{S_r}{U_k \cdot Q_c}}$$

Formel 5-18 - Berechnung der Resonanzfrequenz mit S_r , U_k und Q_c ⁶¹

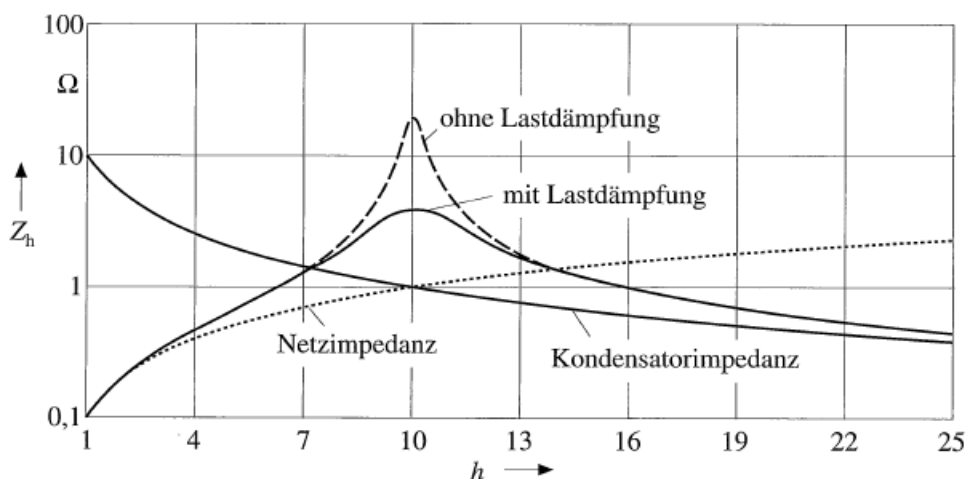


Abbildung 5-51 - Verlauf der Impedanz mit zuvor dargestellter Netzstruktur⁶²

⁵⁹ Vgl. ([43], S. 83)

⁶⁰ Vgl. ([43], S. 83)

⁶¹ Vgl. ([43], S. 84)

⁶² Vgl. ([43], S. 84)

In Abbildung 5-51 ist zu erkennen, dass die Impedanz im Parallelschwingkreis ausgehend von der Impedanz der induktiven Einspeisung bis auf den Maximalwert der Resonanzfrequenz f_{res} steigt und bei weiter steigender Frequenz wieder abnimmt auf den Wert der Impedanz des kapazitiven Anteils.⁶³

Die Impedanz im Resonanzpunkt ist gleich der Impedanz der Einspeisung dividiert durch die Dämpfung d . Die resultierende Impedanz Z_{res} kann mit folgender Formel ermittelt werden:

$$Z_{\text{res}} = \frac{\omega \cdot L}{d}$$

Formel 5-19 - Bestimmung der resultierenden Impedanz⁶⁴

Die Dämpfung im Parallelschwingkreis ergibt sich aus der Wurzel des Verhältnisses aus Induktivität zur Kapazität multipliziert mit dem Kehrwert des ohmschen Anteils.

$$d = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Formel 5-20 - Formel für die Dämpfung d eines Parallelschwingkreises

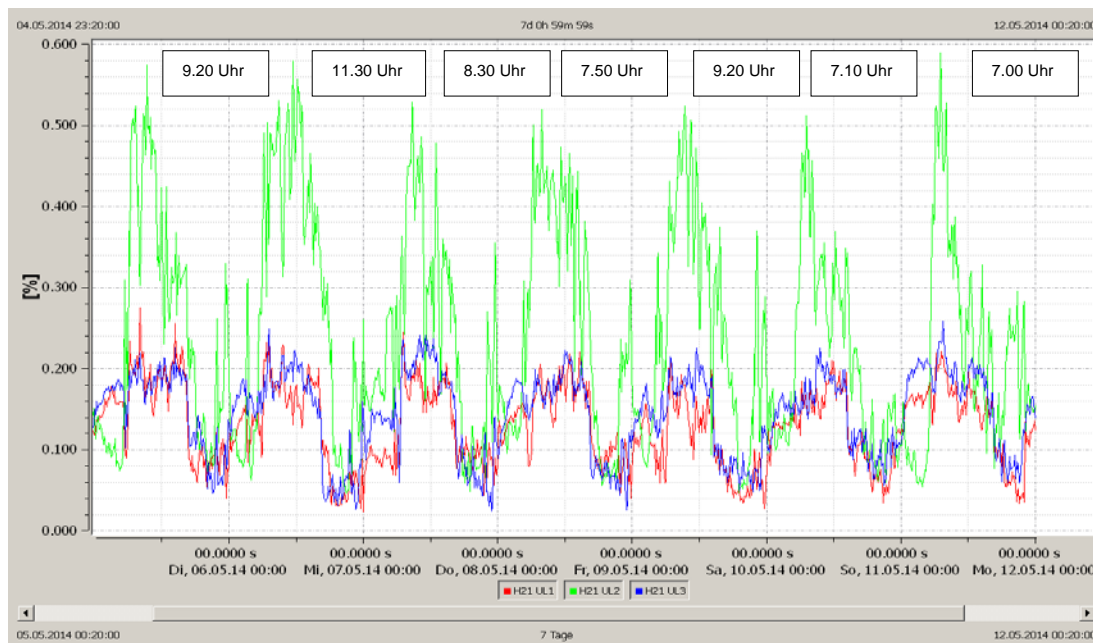


Abbildung 5-52 - Auswertung Wochenverlauf 21. Harmonische Spannung von Leiter L1, L2 und L3 - Messung 8

⁶³ Vgl. ([43], S. 84)

⁶⁴ Vgl. ([43], S. 84)

Die Abbildung 5-52 zeigt als Wochenverlauf den prozentualen Wert der 21. Harmonischen Spannungen bezogen auf die Grundschwingungsspannung, markiert mit der Zeit des höchst gemessenen Wertes von jedem einzelnen Tag.

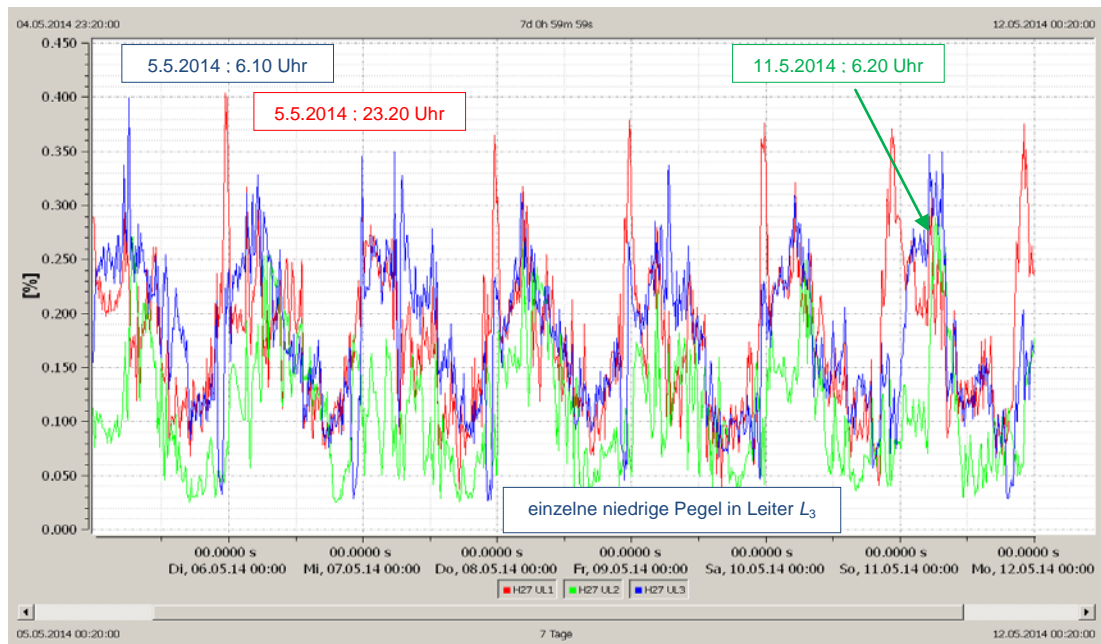


Abbildung 5-53 - Auswertung Wochenverlauf 27. Harmonische Spannungen von Leiter L1, L2 und L3 – Messung 8

Die Abbildung 5-53 zeigt als Wochenverlauf den prozentualen Wert der 27. Harmonischen Spannungen bezogen auf die Grundschwingungsspannung, markiert mit dem Zeitpunkt der höchst gemessenen Werte.

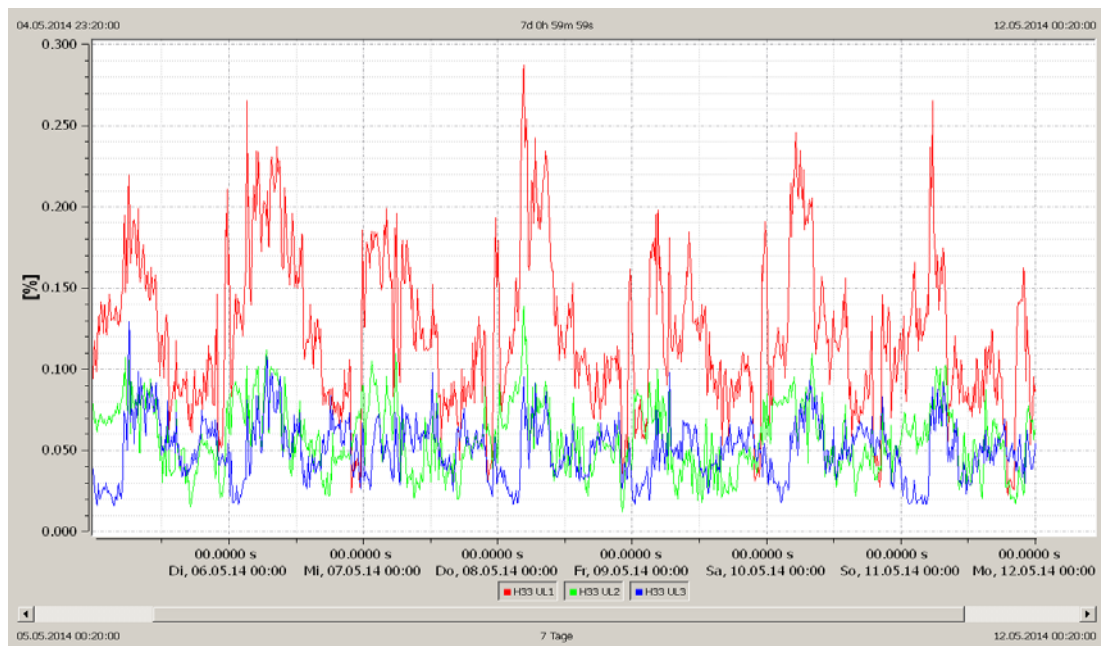


Abbildung 5-54 - Auswertung Wochenverlauf 33. Harmonische Spannungen von Leiter L1, L2 und L3 - Messung 8

Die Abbildung 5-54 zeigt als Wochenverlauf den prozentualen Wert der 33. Harmonischen Spannungen bezogen auf die Grundschwingungsspannung.

5.13 Messung 16 - Station 16

Die Länge des Mittelspannungssystems zwischen Umspannwerk ErX und der Ortsnetzstation 16 beträgt 1,68 km. Das Niederspannungsnetz wird über einen ölisolierten Drehstromtransformator mit einer Nennscheinleistung von 400 kVA Schaltgruppe Dyn5 versorgt. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Über diese Station wird ein Wohngebiet im angrenzenden Innenstadtbereich versorgt. An dieser Station ist eine PV-Anlage mit einer elektrischen Nennwirkleistung von 340 kW angeschlossen. Alle Versorgungskabel sind kunststoffisoliert.

Die Abbildung 5-55 zeigt, dass die Spannungsqualität in dem gemessenen Zeitraum gewährleistet war. Bei dieser Messung wurde erstmals ein negativer Bezug der Wirkleistung gemessen.

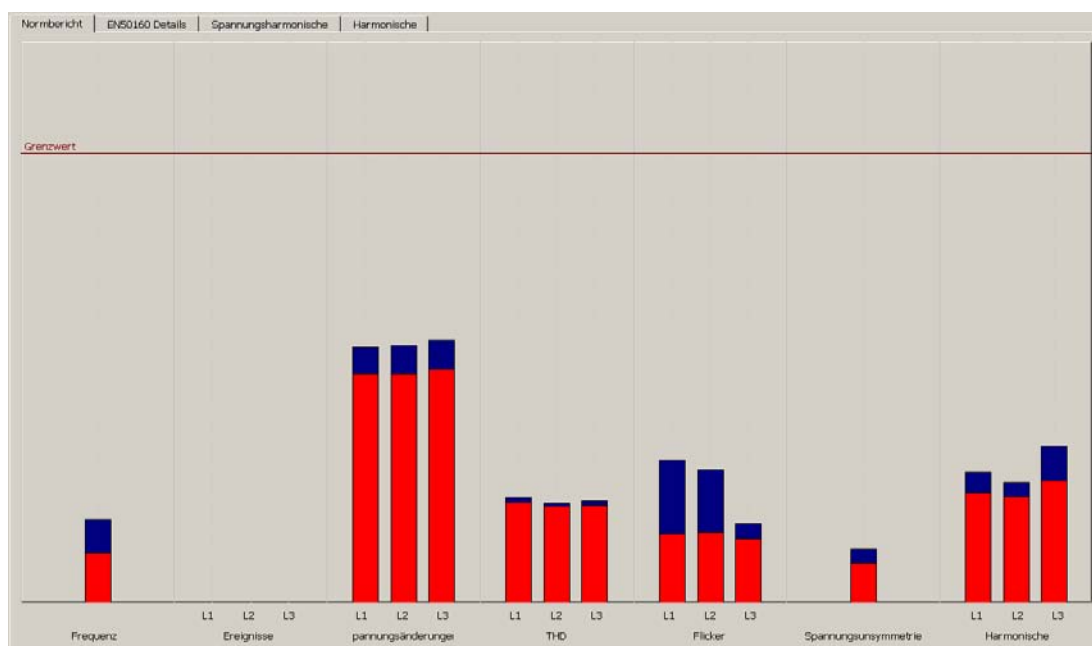


Abbildung 5-55 - Normbericht - Messung 16

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 243,11 \text{ V}, U_{L2} = 243,20 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 243,47 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 233,05 \text{ V}, U_{L2} = 233,02 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 233,793 \text{ V}.$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,24 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am 6. Mai 2014 um 21.00 Uhr in Leiter L3 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für:

$$I_{L1} = 131,3 \text{ A}, I_{L2} = 155,0 \text{ A} \text{ und } I_{L3} = 201,4 \text{ A}.$$

Eine Auswertung der Gesamtwirkleistung P_{total} - siehe Abbildung 5-56 - zeigt einen maximalen Wirkleistungsbezug von rund 118 kW am 7. Mai 2014 um 21.10 Uhr. Die

maximale Wirkleistungseinspeisung wurde am 7. Mai 2014 um 13.00 Uhr mit 105,6 kW gemessen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die PV-Anlage ihr Leistungsmaximum zu keinem Zeitpunkt der Messung erreicht hat.

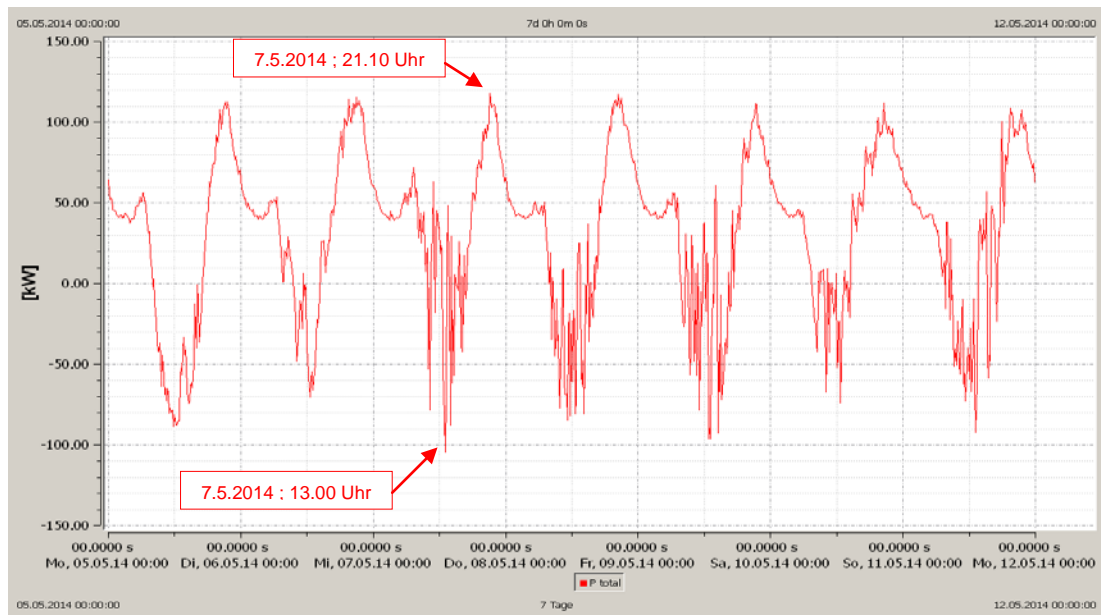


Abbildung 5-56 - Auswertung der Wirkleistung P_{total} - Messung 16

Einen nahezu ähnlichen Verlauf über den gesamten Zeitraum der Messung zeigt in der Abbildung 5-57 die Auswertung des Neutralleiterstroms mit dem Nullstrom der Grundschiwingung und den Nullstrom der 3. Harmonischen. In der typischen Fernsehspitze zwischen 18.00 Uhr und 23.00 Uhr ist der Anteil des 3. Harmonischen Nullstromes höher als der Nullstrom der Grundschiwingung.

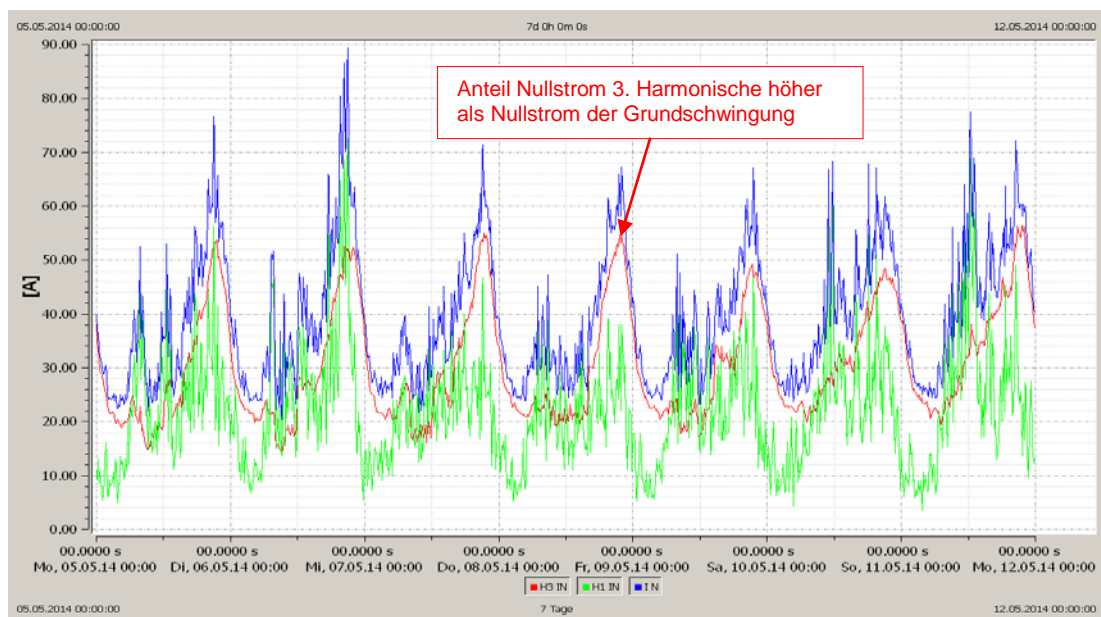


Abbildung 5-57 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung und 3. Harmonischer Nullstrom - Messung 16

5.14 Messung 16.1 - Station 16

Die Messung 16.1 wurde an der mittelspannungsseitigen Übergabe der Station 16 zu einer Kundenanlage durchgeführt. Der Übergabe nachgeschaltet sind zwei kundeneigene Transformatoren die eine größere Bildungseinrichtung versorgen.

Die Messung zeigt in der Abbildung 5-58 ein hierfür typisches Verhalten. An den Wochentagen steigt die Wirkleistung gegen 6.00 Uhr deutlich an, erreicht zwischen 11.00 Uhr bis 14.00 Uhr ihr Maximum und fällt gegen 22.00 Uhr auf eine Grundlast von 130 kW bis 150 kW zurück. Die maximale ermittelte Wirkleistung betrug am Mittwoch den 7. Mai 2014 12.20 Uhr 393 kW.

Am Samstag steigt die Wirkleistung zwischen 7.00 Uhr und 15.00 Uhr auf maximal 180 kW an. Sonntags ist eine konstante Grundlast über den gesamten Tag zu verzeichnen.

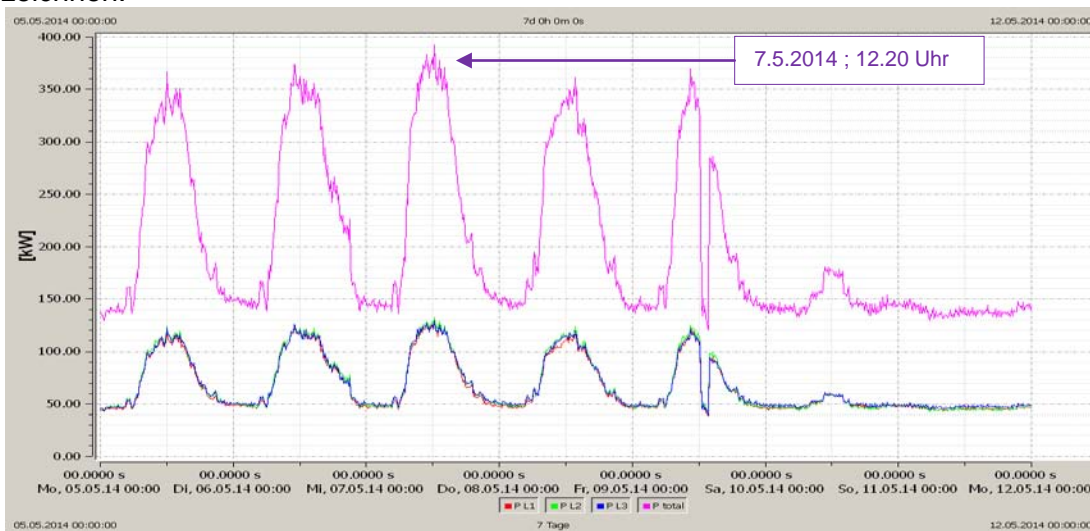


Abbildung 5-58 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} - Messung 16.1

Der Normbericht, siehe Abbildung 5-59, der Messung 16.1 weist auf keinerlei ungewöhnliche Merkmale hin. Im gesamten Messzeitraum wurden die Grenzwerte der EN 50160 eingehalten.

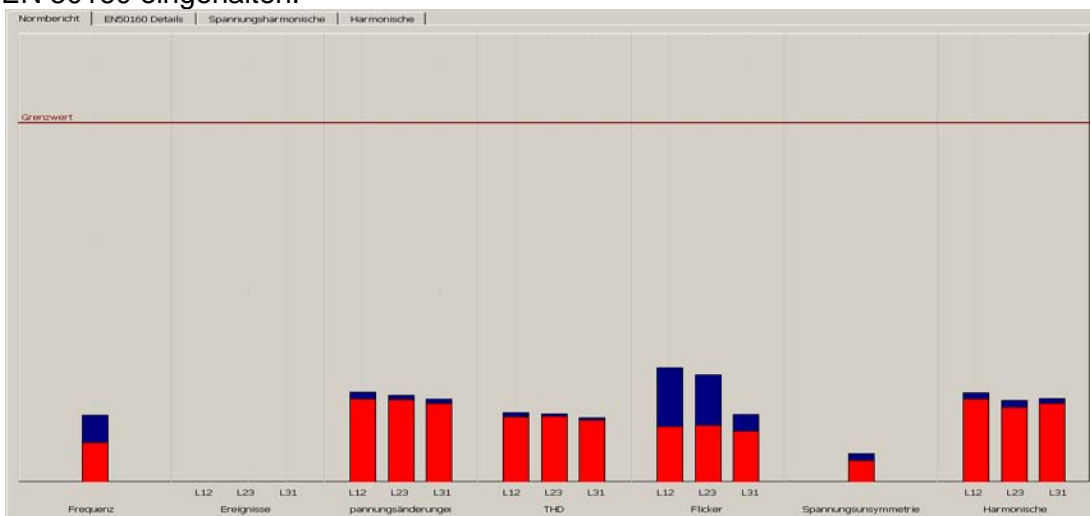


Abbildung 5-59 - Normbericht - Messung 16.1

Eine Auswertung der Effektivwerte der Leiter-Leiter-Spannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} zeigt, mit Hinblick der Versorgung der Station in unmittelbarer Nähe des Umspannwerkes, dass das vorgegebene Spannungsband im Umspannwerk von 10,2 kV bis 10,6 kV eingehalten wird.

In der nachfolgenden Abbildung 5-60 ist der Wochenverlauf der Leiter-Leiter-Spannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} dargestellt. Ein Vergleich der Effektivwerte der Spannungen von Messung 16 und Messung 16.1 zeigt einen nahezu identischen Verlauf und bestätigt, dass im umspannwerknahe Bereich die Effektivwerte der Niederspannung durch das Verhalten der Mittelspannung beeinflusst werden.

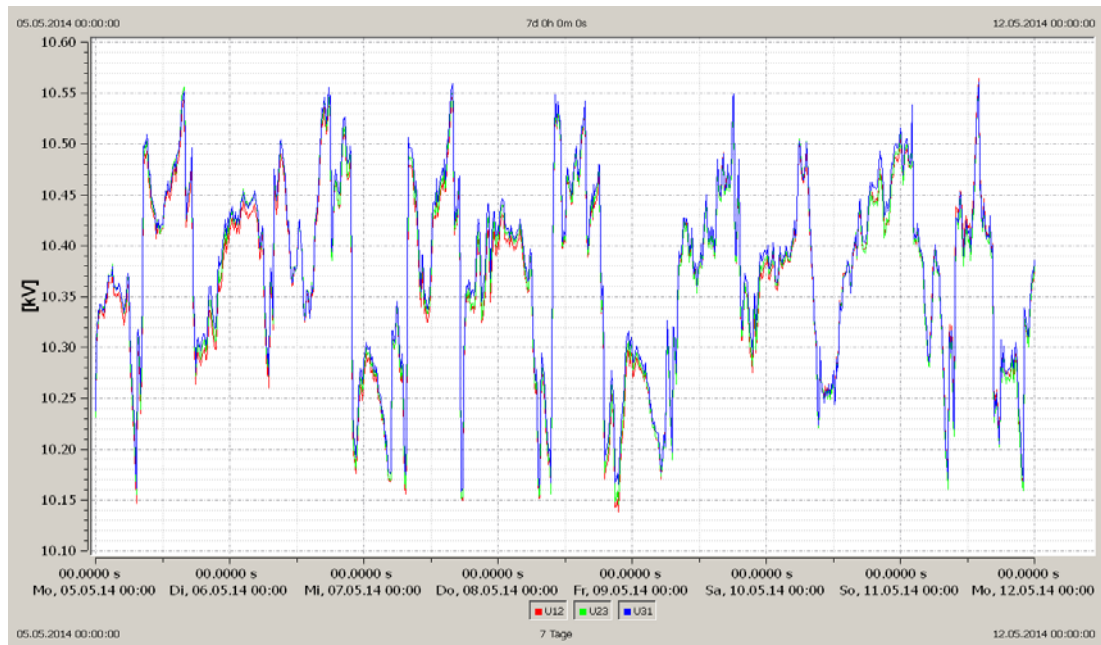


Abbildung 5-60 - Auswertung Wochenverlauf der Leiter-Leiter-Spannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} - Messung 16.1

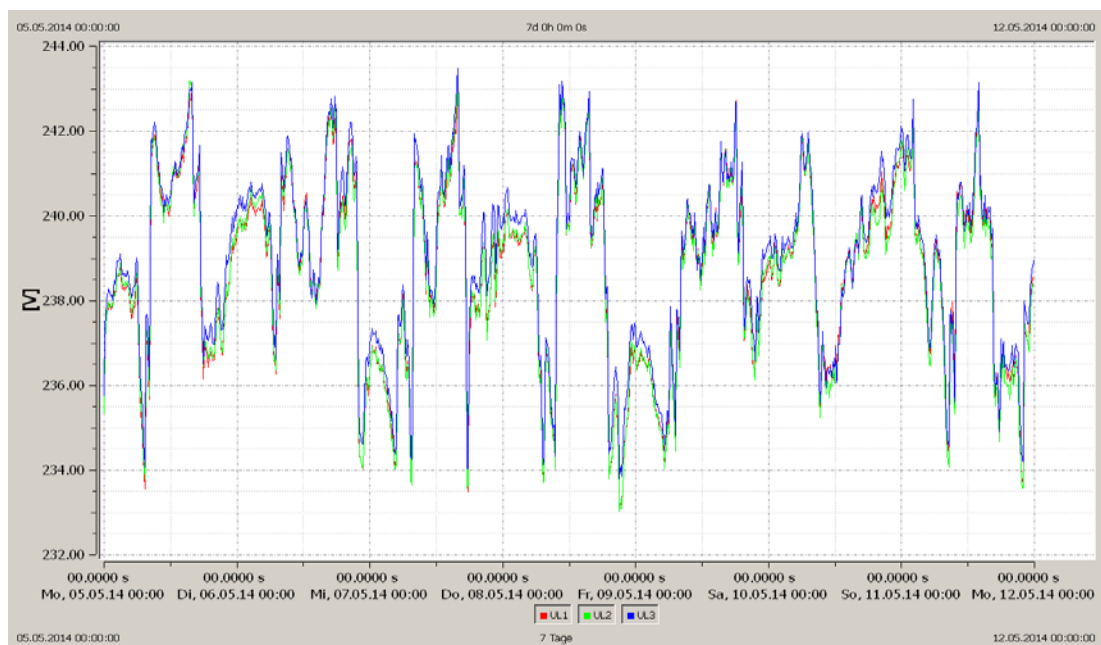


Abbildung 5-61 - Auswertung Wochenverlauf der Leiter-Erde-Spannungen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} - Messung 16

5.15 Messung 15 - Ortsnetzstation 15

Die vom Umspannwerk „ErX“ Ortsnetzstation 15 ist mit einem 630 kVA ölisierten Drehstromtransformator Schaltgruppe Dyn5 ausgestattet. Die Systemlänge des Mittelspannungssystems zwischen Umspannwerk und Ortsnetzstation 15 beträgt 2,22 km. Das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist 10,4/0,42 kV.

Die Ortsnetzstation versorgt ein Wohngebiet. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-62 zeigt, dass alle zulässigen Grenzwerte der EN 50160 im gesamten Messzeitraum eingehalten wurden und damit die Spannungsqualität entsprechend dieser Norm gewährleistet war.

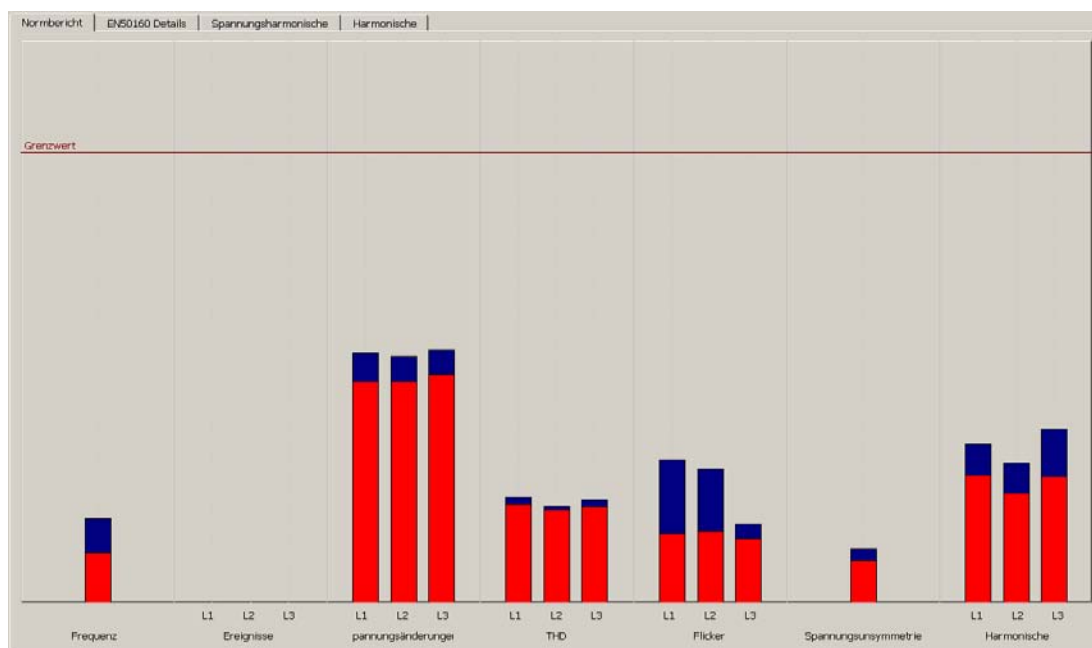


Abbildung 5-62 - Normbericht - Messung 15

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 242,79 \text{ V}$, für $U_{L2} = 242,62 \text{ V}$ und für $U_{L3} = 242,95 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 232,88 \text{ V}$, für $U_{L2} = 232,96 \text{ V}$ und für $U_{L3} = 233,63 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,24 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Sonntag den 11. Mai 2014 um 12.00 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die effektiven Leiterströme betragen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 209,6 \text{ A}$, $I_{L2} = 184,9 \text{ A}$ und $I_{L3} = 104,2 \text{ A}$.

Zu dem gleichen Zeitpunkt wurde ebenfalls die höchste Wirkleistung P_{total} gemessen. Die folgende Abbildung 5-62 zeigt den Wochenverlauf der Wirkleistung P_{total} und die Einzelwirkleistungen P_{L1} , P_{L2} und P_{L3} . Die Wirkleistung P_{L3} zeigt eine deutliche Abweichung zu den anderen Wirkleistungen P_{L1} und P_{L2} . Diese Abweichung ist

das Resultat einer unsymmetrischen Phasenaufteilung der elektrischen Verbraucher.

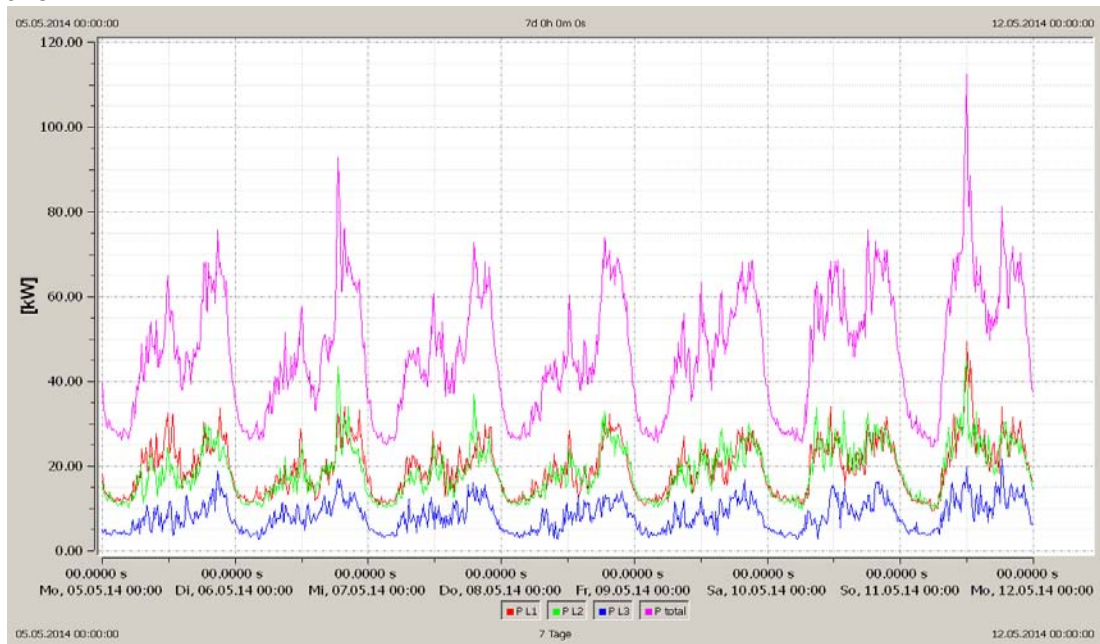


Abbildung 5-63 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistungen P_{L1} , P_{L2} , P_{L3} und P_{total} - Messung 15

Die Messung 15 zeigt einen erhöhten Neutralleiterstrom I_N , - siehe Abbildung 5-64 -, der in der Regel sein Maximum gegen 19.00 Uhr erreicht. Die Maximalwerte des 3. Harmonischen Nullstromes werden täglich in den Abendstunden zwischen 18.00 und 23.00 Uhr erreicht. In dieser Zeit ist der Nullstrom der 3. Harmonischen wiederum höher als der Grundschwingungsnullstrom.

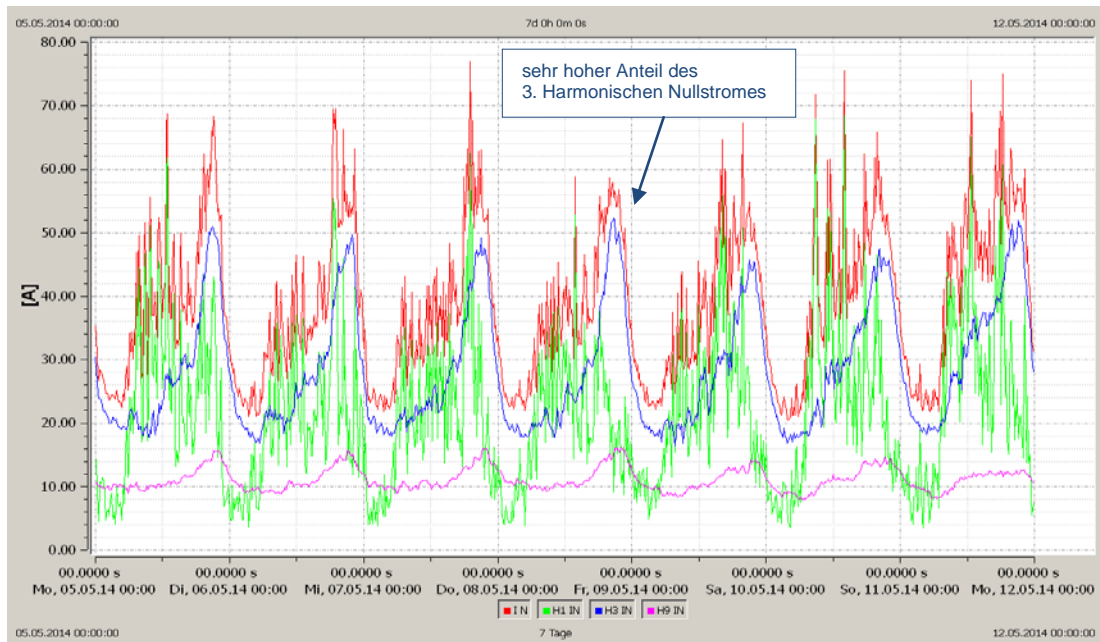


Abbildung 5-64 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschwingung sowie 3. und 9. Harmonischen Nullströme - Messung 15

5.16 Messung 14 - Station 14

Die vom Umspannwerk „ErX“ versorgte Station 14 ist mit einem 630 kVA ölisierten Drehstromtransformator ausgerüstet. Die Schaltgruppe ist Dyn5. Die Systemlänge der Mittelspannungsleitung zwischen Umspannwerk und Ortsnetzstation 14 beträgt 2,51 km.

Das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist 10,4/0,42 kV.

Die Station versorgt ein Bürogebäude und einen Gewerbebereich. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-65 zeigt die Einhaltung der Spannungsqualität nach EN 50160 über den gesamten gemessenen Zeitraum, wobei das höhere Spektrum der Harmonischen Spannungen auffällt.

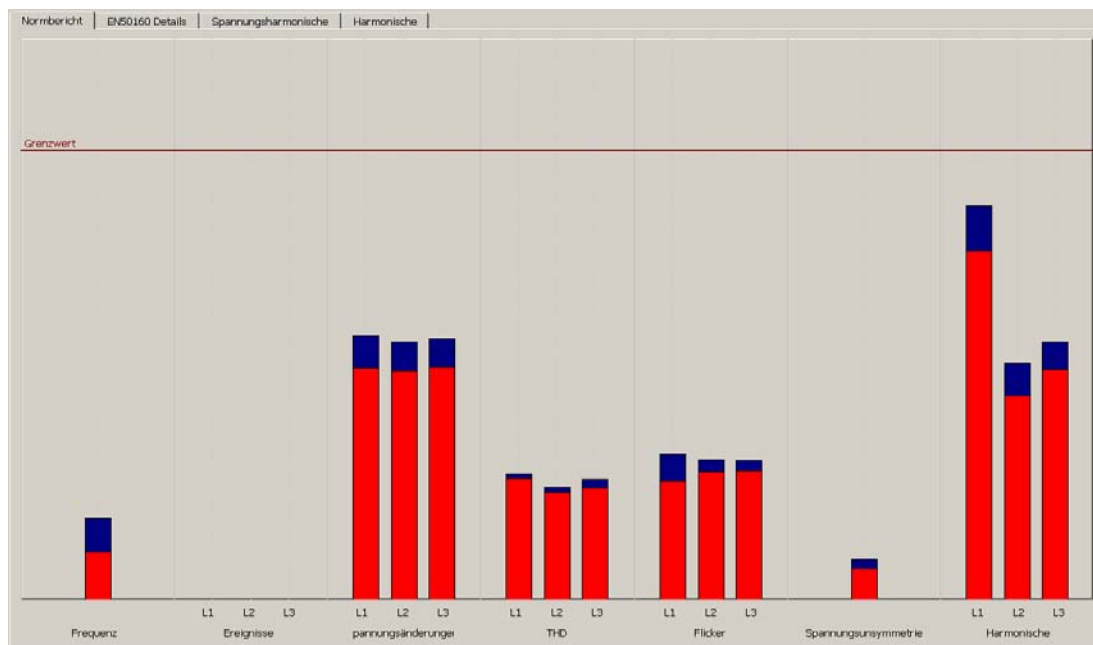


Abbildung 5-65 - Normbericht - Messung 14

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 243,54 \text{ V}$, für $U_{L2} = 243,24 \text{ V}$ und für $U_{L3} = 243,87 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 233,58 \text{ V}$, für $U_{L2} = 233,53 \text{ V}$ und für $U_{L3} = 233,63 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie ergab 0,32 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Dienstag den 6. Mai 2014 um 13.50 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die effektiven Leiterströme betrugen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 152,9 \text{ A}$, $I_{L2} = 112,6 \text{ A}$ und $I_{L3} = 129,1 \text{ A}$.

In der folgenden Abbildung 5- 66 ist der Verlauf des Kurzzeitflickers P_{st} der Außenleiter L1, L2 und L3 dargestellt. Der Grenzwert des Kurzzeitflickers P_{st} beträgt 1.

Es ist zu erkennen, dass an allen Wochentagen in der Zeit von 7.00 Uhr bis 18.00 Uhr erhöhte Werte bis maximal 0,4 in allen drei Außenleitern auftreten.

Die Ursachen hierfür liegen in einen nahegelegenen Kraftfahrzeugbetrieb. Hier werden durch ständigen kurzzeitigen Betrieb von Betriebsmitteln mit motorischen Lasten erhöhte Flickerwerte erreicht.

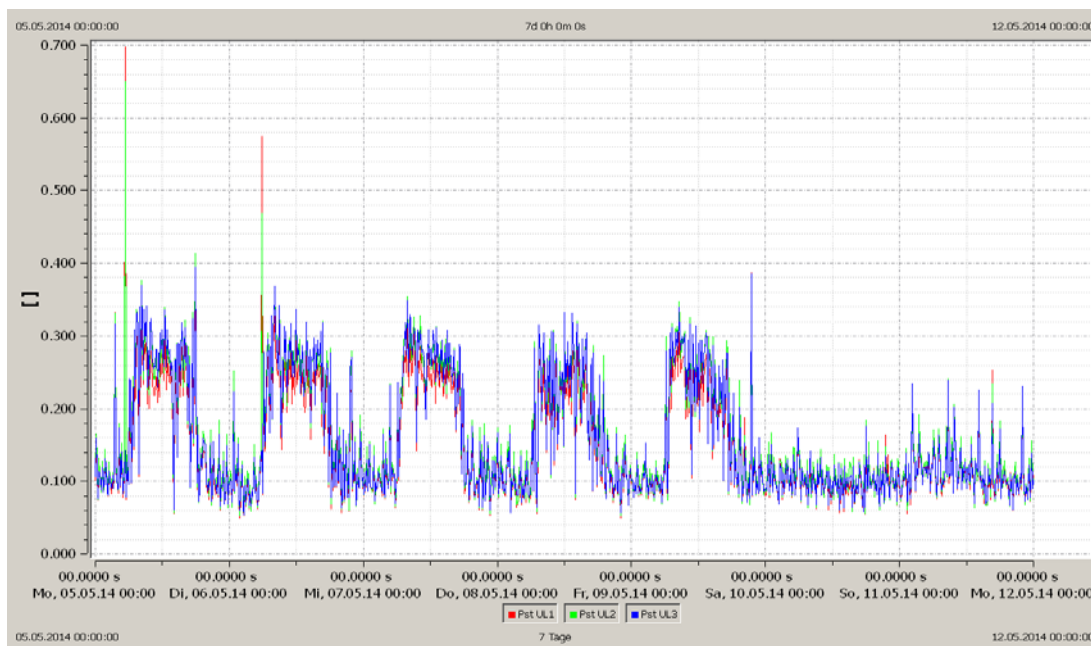


Abbildung 5-66 - Auswertung Wochenverlauf Kurzzeitflicker P_{st} von Leiter L1, L2 und L3 - Messung 14

In diesem Zusammenhang zeigt die Auswertung der Abbildung 5-68 auf der nächsten Seite, dass in den gleichen Zeiträumen erhöhte Anteile der 5., 7. und 11., 13. Harmonischen auftreten. Dies ist ein Indiz dafür, dass im versorgten Netzgebiet 6-Puls bzw. 12-Puls-Gleichrichteranlagen im Einsatz sind.

Laut einer technischen Anleitung für Netzoberschwingungen von AC-Antrieben kann bei der Ansteuerung durch Wechselrichter der Anteil des 5. Oberschwingungsstroms unverdrosselt bis zu 63% der Grundschwingung betragen.⁶⁵

Herstellungskosten 100%
Typische Oberschwingungen des Stroms.

Grundwelle	5·	7·	11·	13·	17·	19·
100%	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%

Abbildung 5-67 - 6-Puls-Gleichrichter ohne Drossel für Kleinantriebe⁶⁶

⁶⁵ Vgl. ([44], 2014)

⁶⁶ Vgl. ([44], 2014)

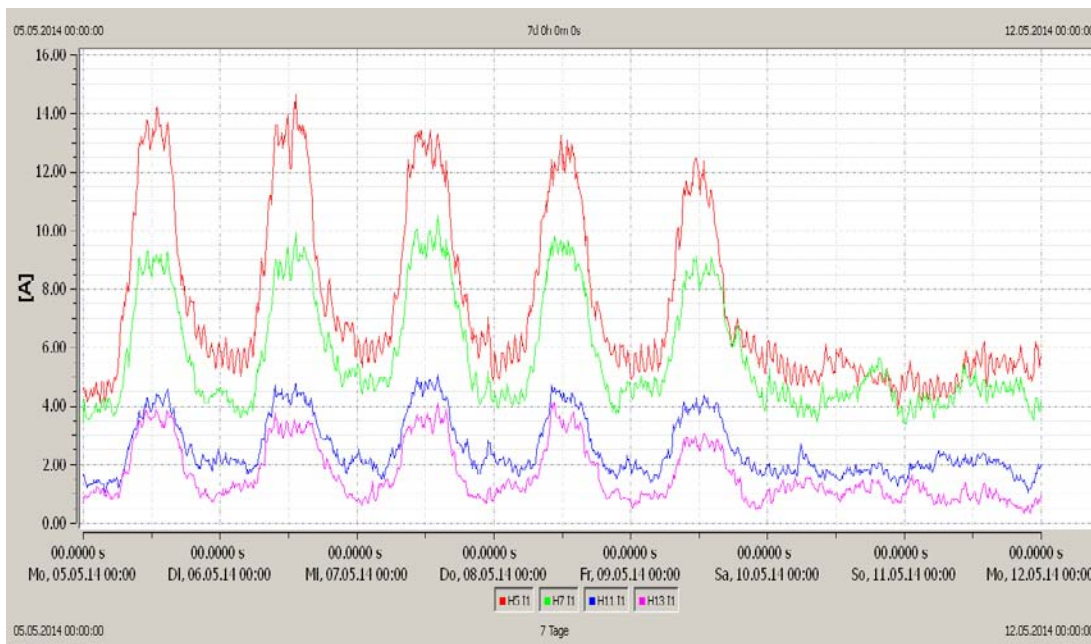


Abbildung 5-68 - Auswertung Wochenverlauf. der 5. und 7 ; 11 und 13. Harmonischen Ströme in Leiter L1, - Messung 15

5.17 Messung 14.1 - Station 14

Die Messung 14.1 wurde an der mittelspannungsseitigen Übergabe der Station 14 zu einer Kundenanlage durchgeführt. Der Übergabe nachgeschaltet ist ein kunden-eigener Transformator mit einer Nennscheinleistung von 630 kVA. Über diesen Transformator wird ein Gewerbebereich versorgt.

Die Messung weist keinerlei ungewöhnliche Merkmale auf. Dies zeigt die folgende Abbildung 5-69 mit dem Normbericht, der bestätigt, dass die Einhaltung der Spannungsqualität zu jedem Zeitpunkt der Messung gewährleistet war.

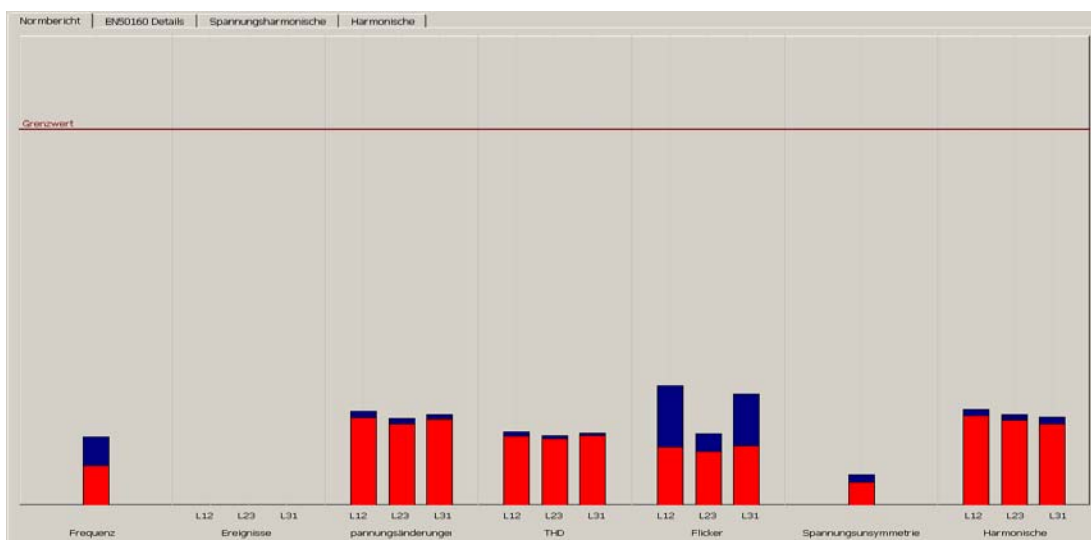


Abbildung 5-69 - Normbericht - Messung 14.1

Der Wochenverlauf der Leiter-Leiter-Spannungen U_{12} , U_{23} und U_{31} ist nahezu identisch mit den Werten der Messung 16.1.

Typisch ist auch der Verlauf der Wirkleistung P_{total} und der Blindleistung Q_{total} . Siehe Abbildung 5-70. Mit einem Leistungsanstieg an allen Wochentagen gegen 6.00 Uhr und einem Leistungsminimum gegen 19.00 Uhr.

In den zuvor genannten Zeiten pendelt der Leistungsfaktor $\cos \phi$ zwischen 0,93 und 1. Dies zeigt, dass die vertraglichen Vereinbarungen zwischen dem Kunden und dem Netzbetreiber, von 0,93 induktiv, für den Leistungsfaktor eingehalten werden.

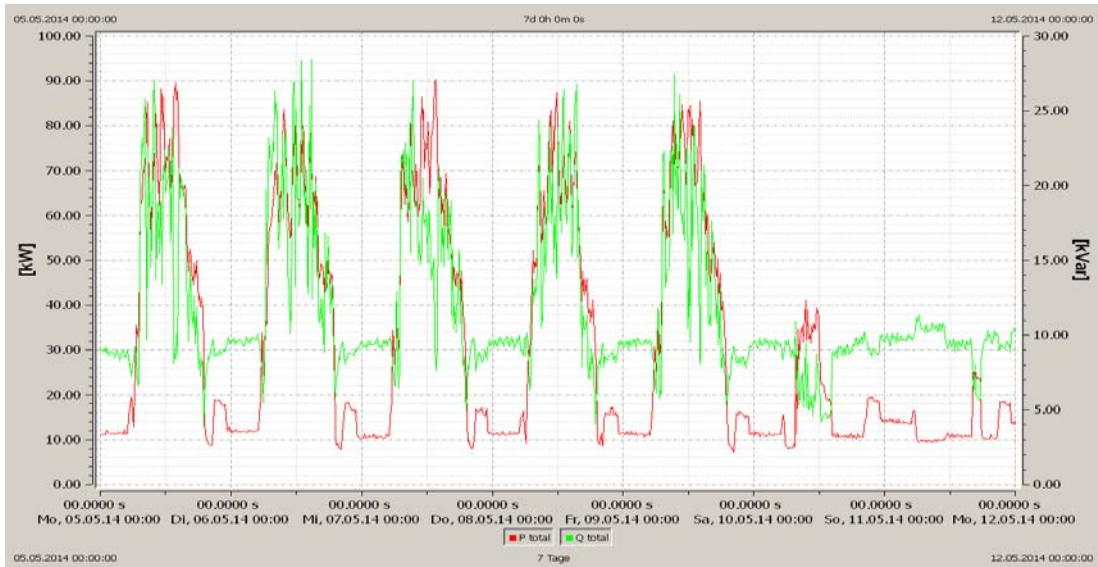


Abbildung 5-70 - Auswertung Wochenverlauf der Wirkleistung P_{total} und Blindleistung Q_{total} - Messung 14.1

Anders stellt sich der $\cos \phi$ in den Zeiten zwischen 19.00 Uhr und 7.00 dar. Hier liegt ein kapazitiver Leistungsfaktor zwischen 0,65 und 0,95 aufgrund der Kabelkapazitäten in Schwachlastzeiten vor. Die Abbildung 5-71 zeigt den Wochenverlauf des Leistungsfaktors $\cos \phi$ der Messung 14.1.



Abbildung 5-71 - Auswertung Wochenverlauf Leistungsfaktor $\cos \phi$ - Messung 14.1

5.18 Messung 13 - Ortsnetzstation 13

Die vom Umspannwerk „ErX“ versorgte Ortsnetzstation 13 ist über eine mittelspannungsseitige Systemlänge von 2,86 km angeschlossen. Sie ist mit einem ölisierten Drehstromtransformator der Schaltgruppe Dyn5, der über eine Nennscheinleistung von 630 kVA verfügt, ausgestattet. Das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist 10,4/0,42 kV.

Die Ortsnetzstation versorgt ein Bürogebäude sowie ein Wohngebiet. In diesem Wohngebiet sind mehrere PV-Anlagen mit einer Gesamtwirkleistung von 122,2 kW installiert. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoff-isolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-72 zeigt, dass alle zulässigen Grenzwerte der EN 50160 im gesamten Messzeitraum eingehalten wurden und damit die Spannungsqualität entsprechend dieser Norm gewährleistet war.

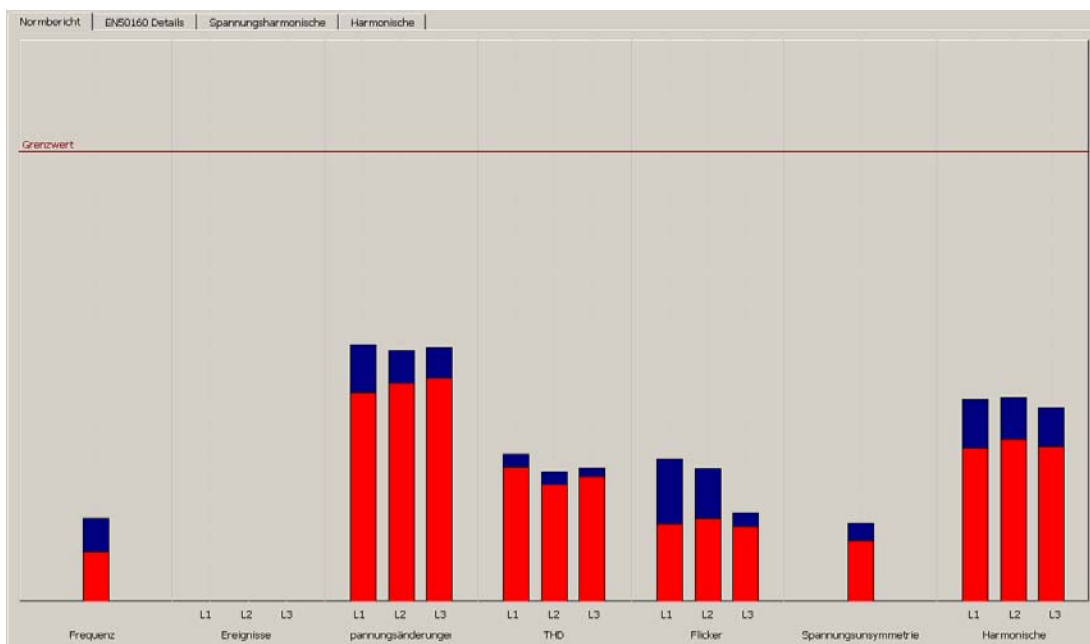


Abbildung 5-72 - Normbericht - Messung 13

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 243,15 \text{ V}$, $U_{L2} = 242,83 \text{ V}$ und $U_{L3} = 243,03 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 231,95 \text{ V}$, $U_{L2} = 232,14 \text{ V}$ und $U_{L3} = 233,12 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie beträgt 0,35 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Mittwoch den 7. Mai 2014 um 21.20 Uhr in Leiter L1 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betrugen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 270,7 \text{ A}$, $I_{L2} = 206,3 \text{ A}$ und $I_{L3} = 188,3 \text{ A}$.

In der folgenden Abbildung 5-73 ist zunächst der Wochenverlauf der Wirkleistung P_{total} mit dem Nullstrom der 3. Harmonischen dargestellt. Dieser zeigt über die gesamte Woche nahezu ähnliche Spitzenwerte zwischen 140 kW und 150 kW, die immer gegen 21.30 Uhr täglich auftreten. Zu diesem Zeitpunkt ist der Nullstrom der 3. Harmonischen typischerweise sehr hoch. Die geringste Leistung wurde am Sonntag den 11. Mai 2014 um 13.10 Uhr mit 2,6 kW gemessen. An diesen Tagen zeigt sich der Einfluss der PV-Anlagen am deutlichsten.

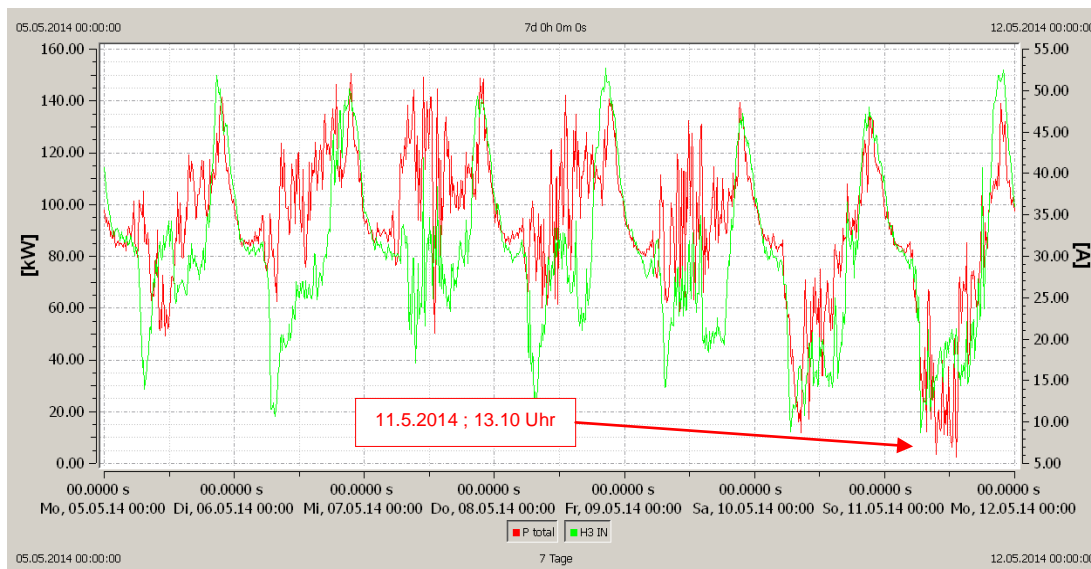


Abbildung 5-73 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistung P_{total} und Nullstrom der 3. Harmonischen - Messung 13

In der Abbildung 5-74 ist der Wochenverlauf des Stroms der 5. Harmonischen Leiter L1 und die Wirkleistung P_{L1} von Leiter 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in Zeiten minimalen Wirkleistungsbezug der Strom der 5. Harmonischen zu nimmt. Die Höchstwerte werden zwischen 11.00 Uhr und 13.00 Uhr erzielt. Dieser Anteil kann im Wesentlichen den Wechselrichtern der PV-Anlagen zugeordnet werden.

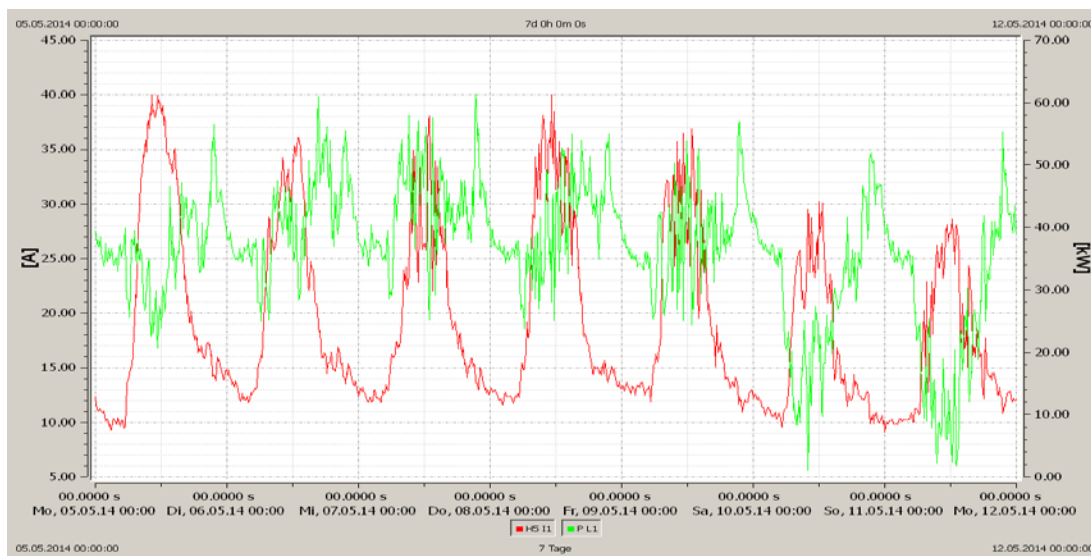


Abbildung 5-74 - Auswertung Wochenverlauf 5. Harmonische Strom Leiter 1 und Wirkleistung von Leiter 1 - Messung 13

5.19 Messung 12 - Ortsnetzstation 12

Die Systemlänge der Mittelspannungsleitung zwischen Umspannwerk UWErX und der Ortsnetzstation 12 beträgt 3,14 km. Sie wird mit einem 400 kVA ölisierten Drehstromtransformator der Schaltgruppe Dyn5 betrieben. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Von dieser Station werden eine Bildungseinrichtung, ein Bürogebäude der Stadtverwaltung Erfurt und ein Wohngebiet versorgt. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-75 zeigt die Gewährleistung der Spannungsqualität entsprechend der Norm EN 50160 über den gesamten Messzeitraum.

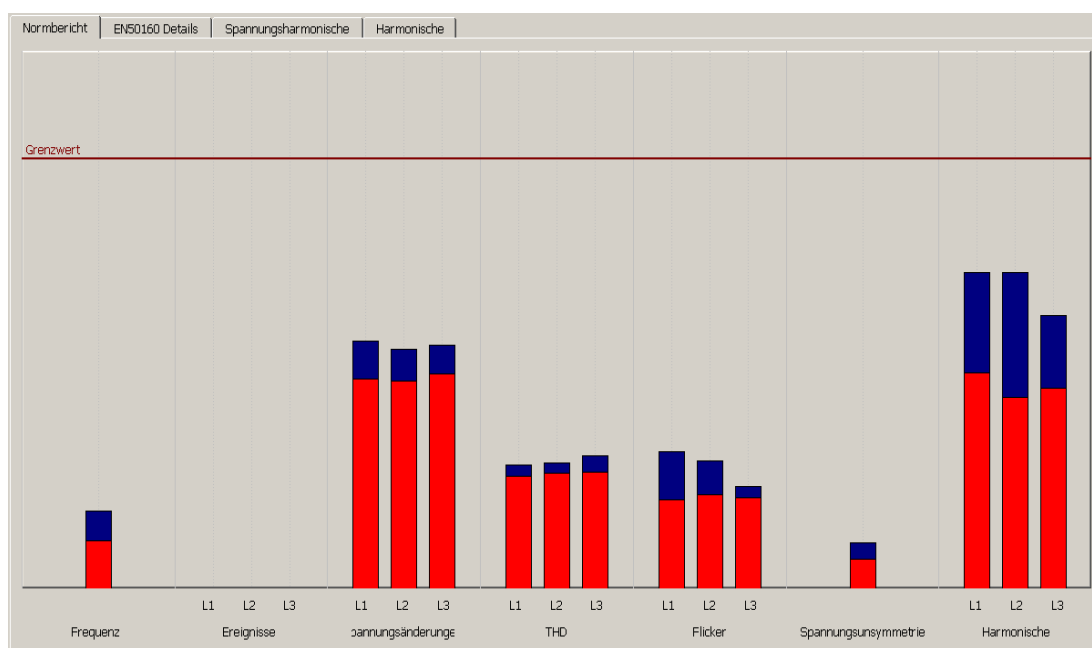


Abbildung 5-75 - Normbericht - Messung 12

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 243,27 \text{ V}$, $U_{L2} = 242,81 \text{ V}$ und $U_{L3} = 243,03 \text{ V}$.

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$U_{L1} = 233,02 \text{ V}$, $U_{L2} = 232,68 \text{ V}$ und $U_{L3} = 233,08 \text{ V}$.

Die maximale Spannungsunsymmetrie beträgt 0,22 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Dienstag den 6. Mai 2014 um 15.20 Uhr in Leiter 3 ermittelt. Die Werte betragen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 303,7 \text{ A}$, $I_{L2} = 303,7 \text{ A}$ und $I_{L3} = 323,3 \text{ A}$.

In der folgenden Abbildung 5-76 ist der Wochenverlauf der Wirkleistung P_{total} und der Nullstrom der 3. Harmonischen dargestellt. Es ist der deutliche Einfluss der Bürotätigkeiten von Montag bis Donnerstag in der Zeit von 8.00 Uhr bis maximal 18.00 Uhr zu erkennen. In diesen Zeiten steigen die Wirkleistung P_{total} und der

Nullstrom der 3. Harmonischen gemeinsam an. Am Freitag in der Zeit von 8.00 Uhr bis 14.00 Uhr üblicherweise in einem kleineren Zeitraum.

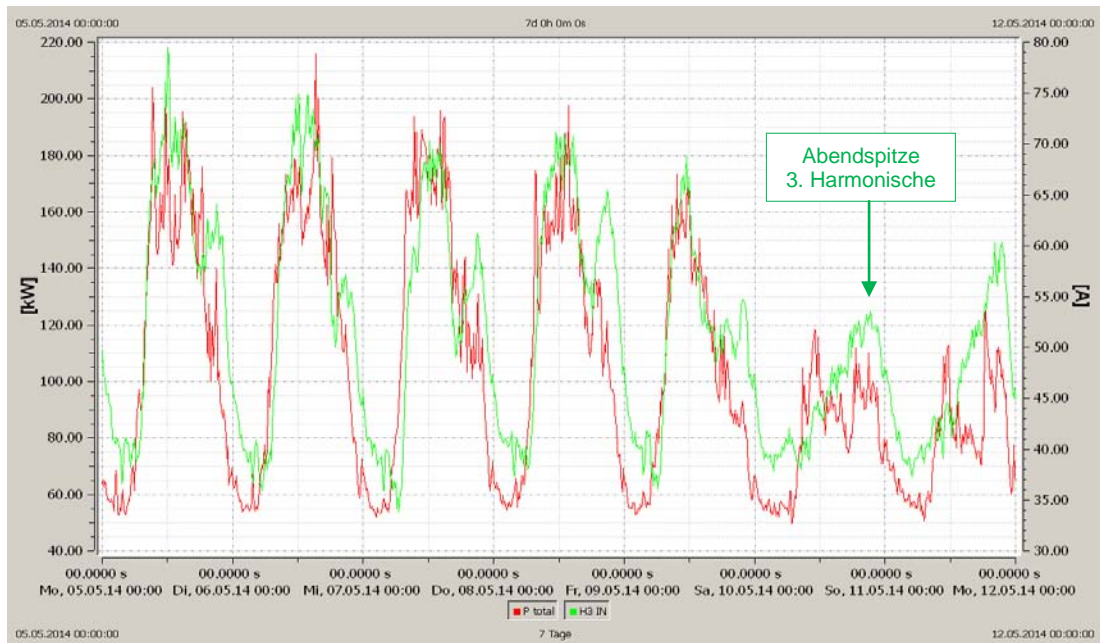


Abbildung 5-76 - Auswertung Wochenverlauf Wirkleistung P_{total} und Nullstrom der 3. Harmonischen - Messung 12

Im Weiteren ist die tägliche Abendspitze der 3. Harmonischen zu erkennen. Diese tritt am Wochenende täglich in der Zeit zwischen 18.00 und 23.00 Uhr auf.

5.20 Messung 11 - Ortsnetzstation 11

Die Länge des Mittelspannungssystems zwischen Umspannwerk UWErX und Ortsnetzstation 11 beträgt 4,55 km. Sie wird mit einem ölisierten Drehstromtransformator mit einer Nennscheinleistung von 400 kVA der Schaltgruppe Dyn5 betrieben. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Von dieser Station werden ein großes Wohngebäude sowie eine angrenzende Gartenanlage versorgt. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 242,07 \text{ V}, U_{L2} = 242,20 \text{ V und } U_{L3} = 242,42 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 233,36 \text{ V}, U_{L2} = 232,46 \text{ V und } U_{L3} = 233,81 \text{ V}.$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie beträgt 0,32 %.

Die Abbildung 5-77 des Normberichtes der Messung 11 zeigt die Gewährleistung der Spannungsqualität im gesamten Messzeitraum.

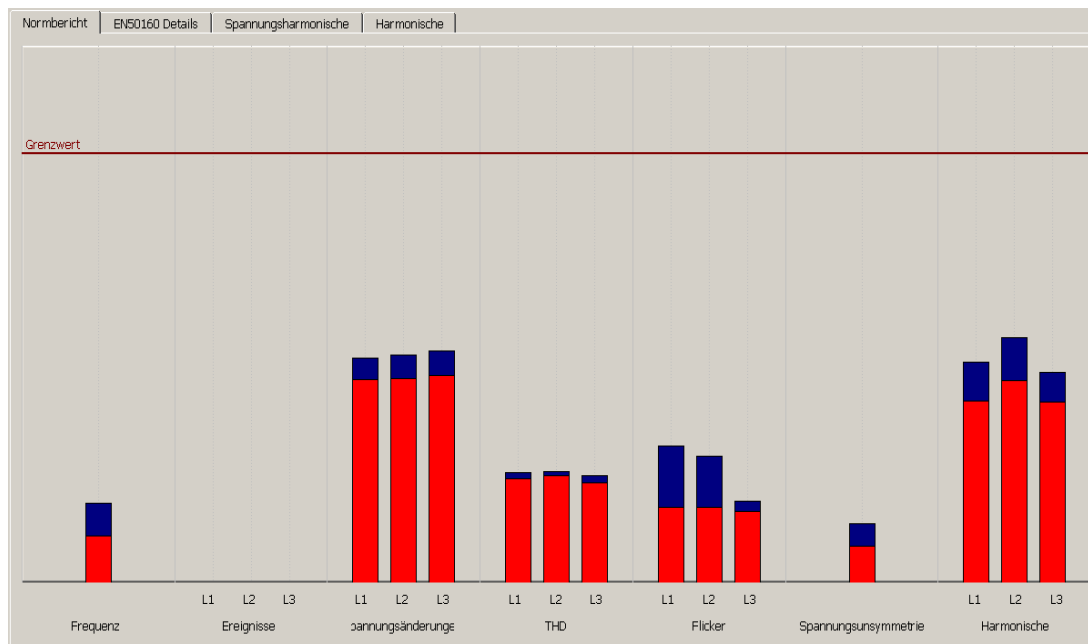


Abbildung 5-77 - Normbericht - Messung 11

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Sonntag den 11. Mai 2014 um 11.30 Uhr in Leiter L2 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betrugen zu diesem Zeitpunkt in $I_{L1} = 266,5 \text{ A}$, $I_{L2} = 306,8 \text{ A}$ und $I_{L3} = 242,8 \text{ A}$.

Der Wochenverlauf der Leiterströme I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} , zeigen ein für diese Art von Versorgungsgebiet, typisches Verhalten.

Die folgende Abbildung 5-78 zeigt die Leiterströme I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} und den Neutralleiterstrom I_N . Alle Ströme zeigen ein über die gesamte Woche, mit Ausnahme am Sonntag den 11. Mai 2014, ähnliches Verhalten.

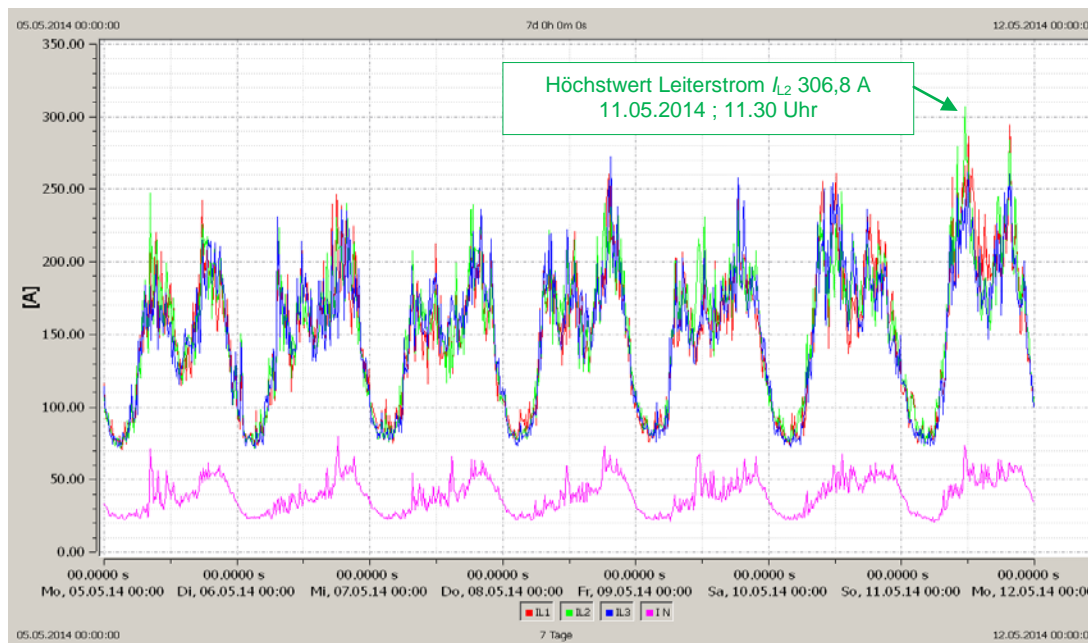


Abbildung 5-78 - Auswertung Wochenverlauf Leiterströme L1, L2, L3 und Neutralleiterstrom - Messung 11

5.21 Messung 10 - Ortsnetzstation 10

Die Systemlänge der Mittelspannung vom Umspannwerk UWErX zur Ortsnetzstation 10 beträgt 4,68 km. Sie ist mit zwei ölisierten Drehstromtransformatoren der Schaltgruppe Dyn5 ausgerüstet. Beide haben eine Nennscheinleistung von 400 kVA. Die Übersetzungsverhältnisse betragen 10,4/0,42 kV. Ein Transformator ist aufgrund der geringen Last außer Betrieb.

Von dieser Station werden eine Fernwärmeübertragungsstation sowie ein Fitnesspark versorgt. Zum Zeitpunkt der durchgeführten Messung war die Auslastung der Ortsnetzstation jahreszeitlich bedingt sehr gering.

Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-79 zeigt eine Gewährleistung der Spannungsqualität entsprechend der Norm EN 50160 über den gesamten Zeitraum.

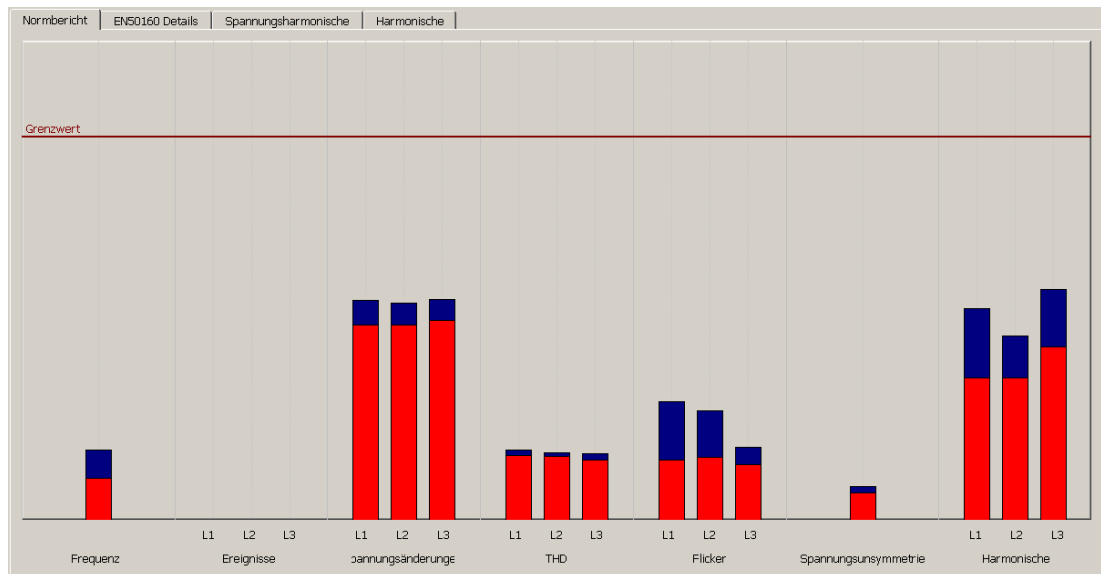


Abbildung 5-79 - Normbericht - Messung 10

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 243,21 \text{ V}, U_{L2} = 243,04 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 243,27 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 233,34 \text{ V}, U_{L2} = 232,44 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 233,76 \text{ V}.$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie beträgt 0,17 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Freitag dem 9. Mai 2014 um 20.40 Uhr in Leiter L2 ermittelt. Die Effektivwerte betrugen zu diesem Zeitpunkt für $I_{L1} = 24,4 \text{ A}$, $I_{L2} = 39,5 \text{ A}$ und $I_{L3} = 21,5 \text{ A}$.

Die folgende Abbildung 5-80 zeigt erhebliche Anteile der 5. Und 7. Harmonischen Ströme. Zum Vergleich der Leiterstrom I_{L3} betrug zu diesem Zeitpunkt 28,0 A.

Dies zeigt den deutlichen Einfluss von 6-pulsigen Wechselrichtern die zur Drehzahlsteuerung von Drehstrommotoren in der Fernwärmeübertragungsstation betrieben werden.

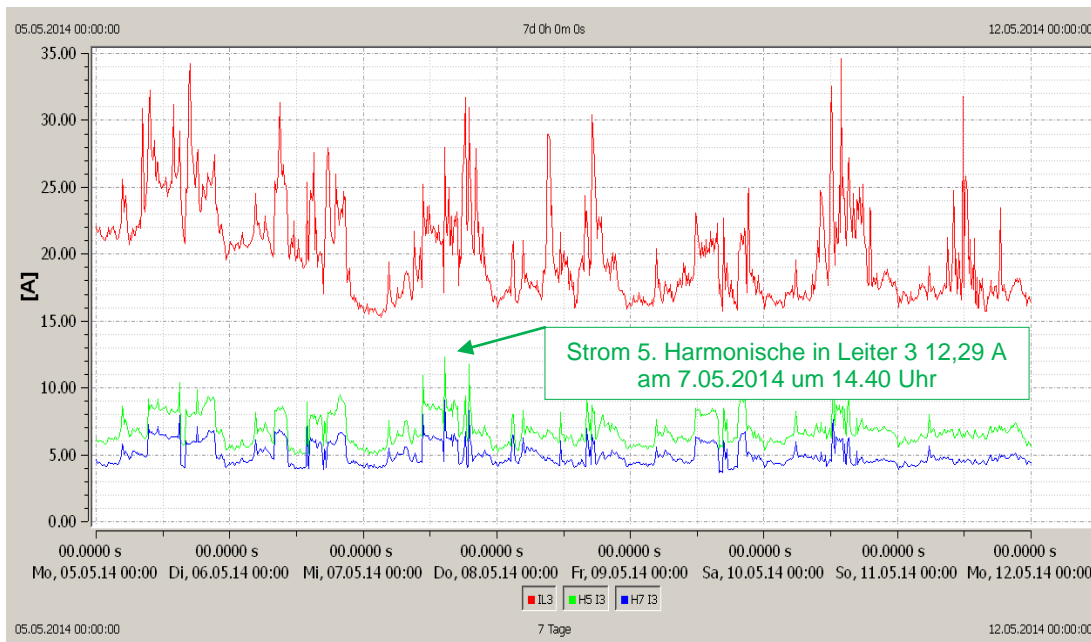


Abbildung 5-80 - Auswertung Wochenverlauf Strom Leiter 3 und Strom der 5. und 7. Harmonischen in Leiter 3 - Messung 10

Die Auswertung der Abbildung 5-81 zeigt, dass in den Zeiten zwischen 22.00 Uhr und 7.00 Uhr ein kapazitiver Leistungsfaktor von 0,8 bis 0,9 vorliegt. In der Fernwärmeübertragungsstation wird eine Kompensationsanlage betrieben.

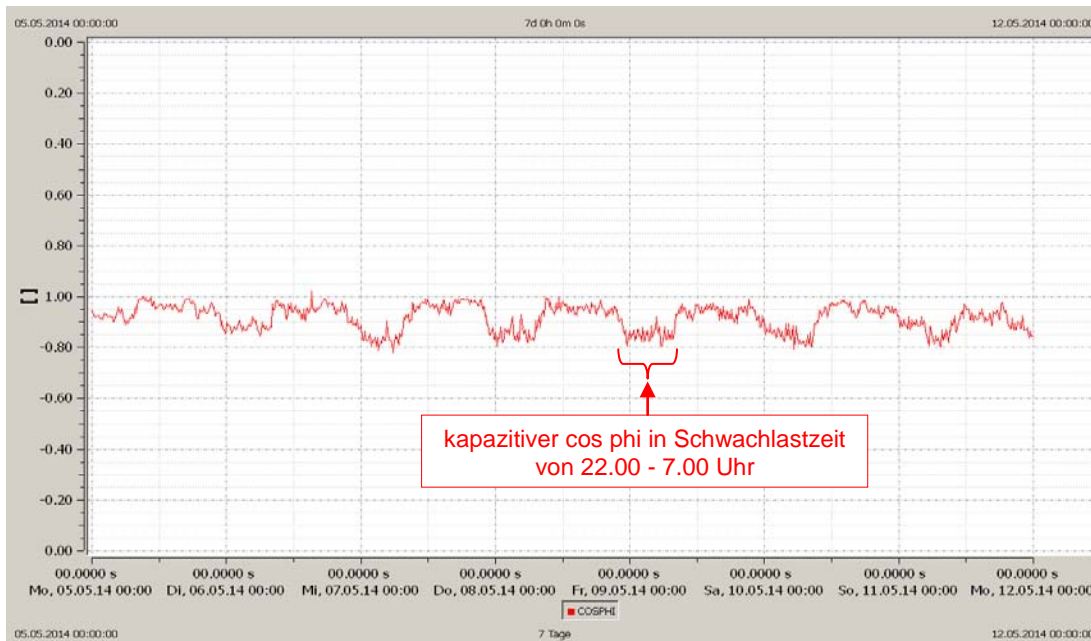


Abbildung 5-81 - Auswertung Wochenverlauf Leistungsfaktor cos phi - Messung 10

5.22 Messung 9 - Ortsnetzstation 9

Die Ortsnetzstation 9 wird über eine mittelspannungsseitige Systemlänge von 4,95 km vom Umspannwerk UWErX versorgt. Sie wird mit einem ölisierten Drehstromtransformator mit einer Nennscheinleistung von 400 kVA der Schaltgruppe Dyn5 betrieben. Das Übersetzungsverhältnis ist 10,4/0,42 kV.

Von dieser Station wird ein reines Wohngebiet versorgt. Die Verteilung zu den Verbrauchern erfolgt ausschließlich über kunststoffisolierte Kabelsysteme.

Die Abbildung 5-82 zeigt die Gewährleistung der Spannungsqualität entsprechend der Norm EN 50160 über den gesamten Zeitraum.

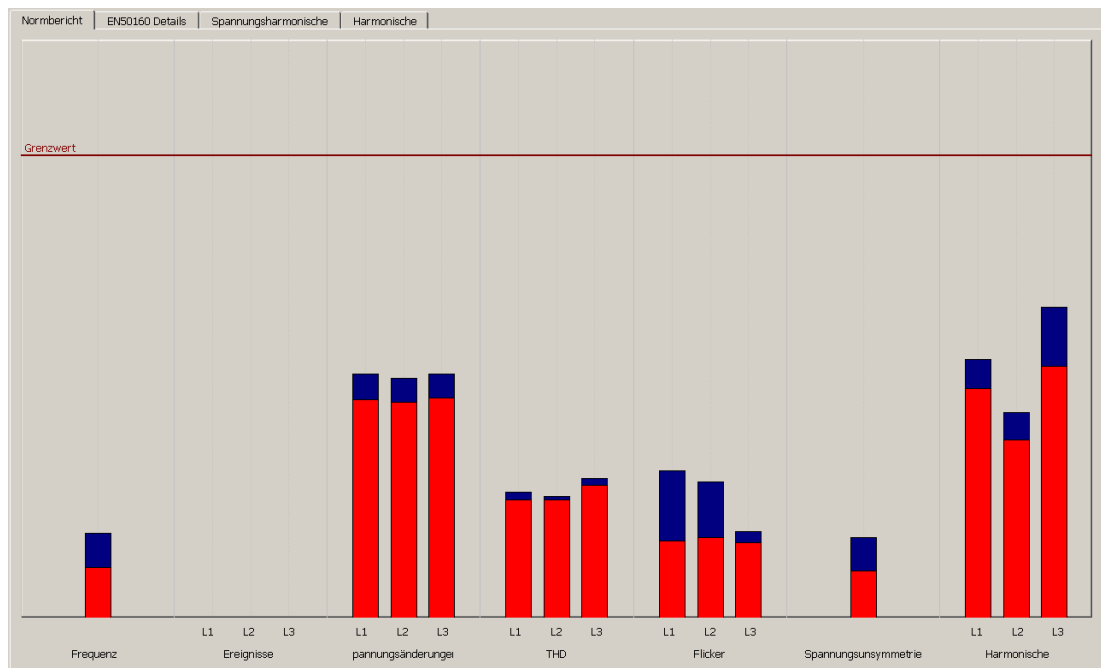


Abbildung 5-82 - Normbericht - Messung 9

Die gemessenen maximalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 242,16 \text{ V}, U_{L2} = 241,93 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 242,14 \text{ V}.$$

Die gemessenen minimalen Effektivwerte der Leiterspannungen betragen für:

$$U_{L1} = 232,29 \text{ V}, U_{L2} = 232,14 \text{ V} \text{ und } U_{L3} = 232,63 \text{ V}.$$

Die maximale Spannungsunsymmetrie beträgt 0,35 %.

Der maximale effektive Leiterstrom wurde am Sonntag dem 11. Mai 2014 um 11.50 Uhr in Leiter L3 ermittelt. Die Effektivwerte der Leiterströme betrugen zu diesem Zeitpunkt für: $I_{L1} = 270,3 \text{ A}$, $I_{L2} = 273,7 \text{ A}$ und $I_{L3} = 318,2 \text{ A}$.

Anhand der Leiterströme I_{L1} , I_{L2} und I_{L3} - siehe Abbildung 5-83 - kann man den typischen Wochenverlauf für ein solches Versorgungsgebiet, mit der höchsten Belastung in der Mittagszeit am Sonntag, erkennen. Die Abbildung zeigt auch, dass

die Neutralleiterbelastung in Zeiten der höchsten Leiterströme geringer ausfallen kann.

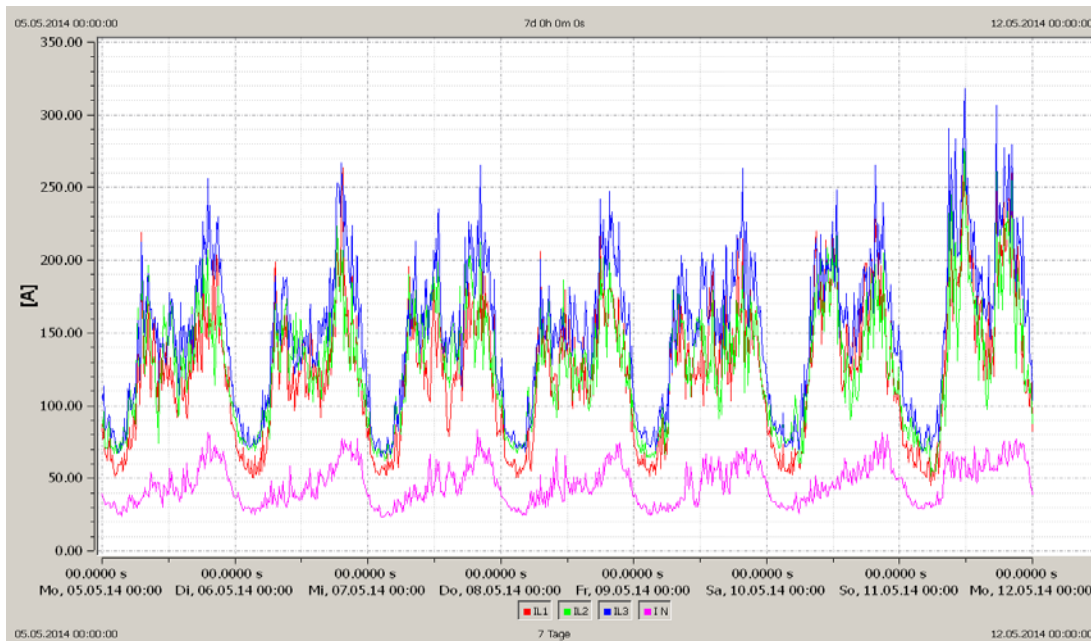


Abbildung 5-83 - Auswertung Wochenverlauf aller Leiterströme und Neutralleiterstrom Messung 9

Die Höchstwerte in der Neutralleiterbelastung werden in den Abendstunden meist zwischen 18.00 und 23.00 Uhr, mit verursacht durch große Anteile der 3. Harmonischen Ströme, erreicht. Die folgende Abbildung 5-84 zeigt den Wochenverlauf der Nullströme im Neutralleiter, der Grundschiwingung und der 3. Harmonischen.

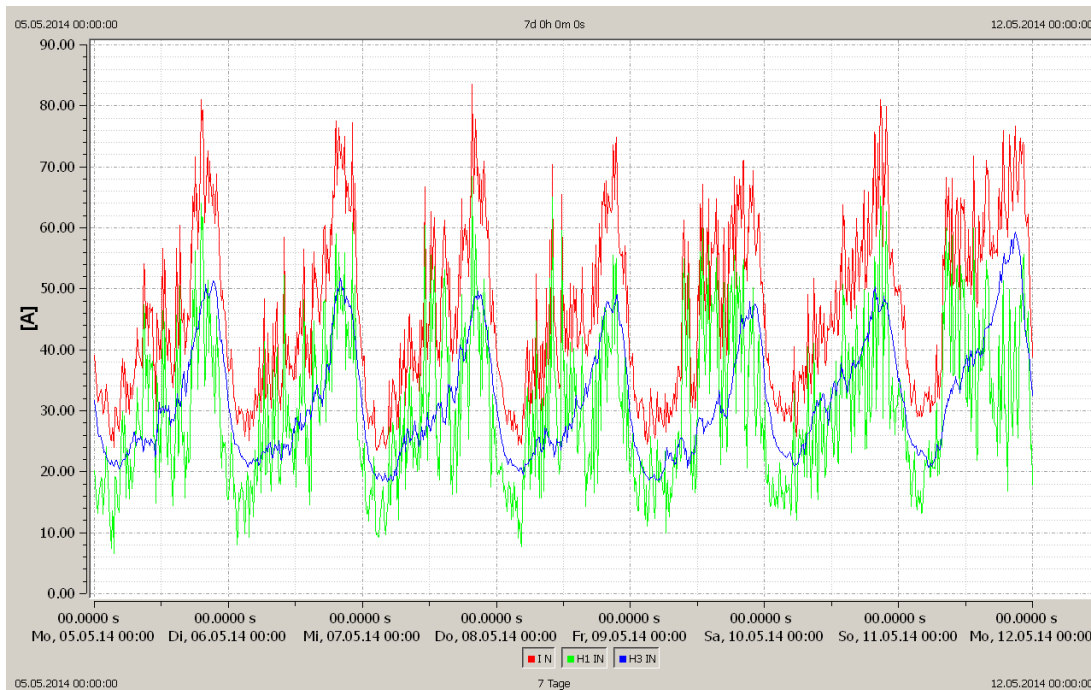


Abbildung 5-84 - Auswertung Wochenverlauf Neutralleiterstrom, Nullstrom der Grundschiwingung und 3. Harmonischen Nullstrom - Messung 9

Ein Vergleich des Leistungsfaktors $\cos \phi$ zwischen Messung 10 und 9 zeigt, dass der Blindleistungsbedarf der Grundschiwingung in Wohngebieten ohne nennenswerte Einspeiser gering ist. Bei der Messung 9 - siehe Abbildung 5-85 - schwankt der Leistungsfaktor $\cos \phi$ zwischen 0,98 induktiv bis 1.

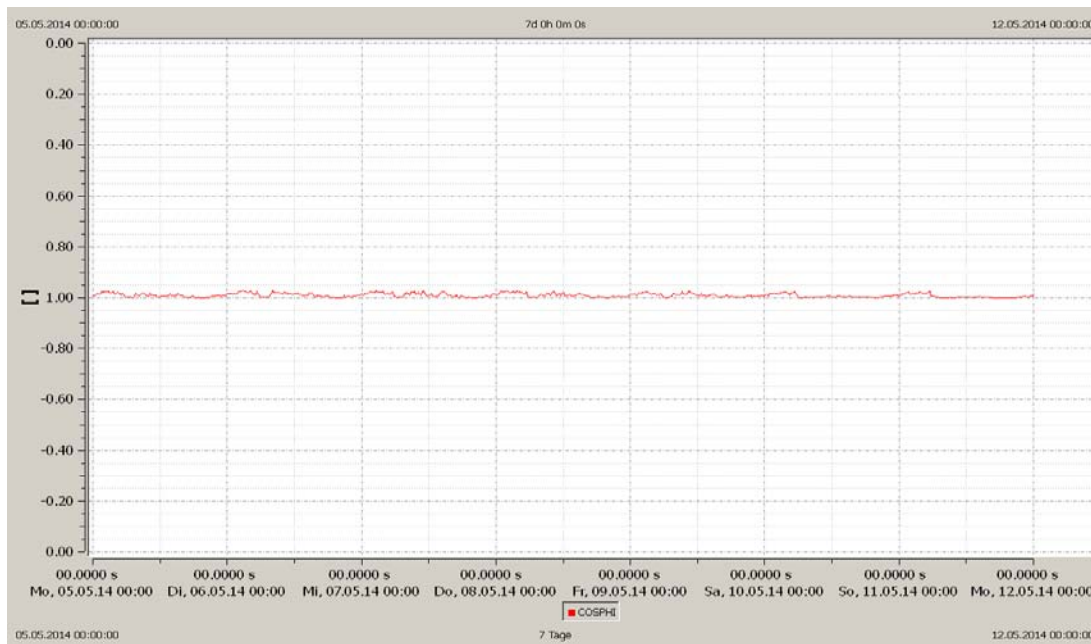


Abbildung 5-85 - Auswertung Wochenverlauf Leistungsfaktor $\cos \phi$ - Messung 9

5.23 Zusammenfassung - Allgemeine Erkenntnisse

5.23.1 Spannungsänderungen

In allen durchgeführten Messungen wurde keine Verletzung an den effektiven Spannungswerten festgestellt.

Die maximalen Effektivwerte (Grenzwert 253,0 V) erreichen bis zu 244,0 V. Die minimalen Effektivwerte (Grenzwert 207,0 V) betragen rund 232,0 V.

Die Gewährleistung der zulässigen Effektivwerte für alle drei Spannungen ist unabhängig der Versorgungsgebiete und Verbraucherverhalten zu jedem Zeitpunkt an allen Messstellen in diesem Netz gegeben. Hierfür ist die Auslastung der Transformatoren, die maximal 50 % der Nennscheinleistung des Transformators erreichen, mit entscheidend.

Die folgenden Abbildungen 5-86 und 5-87 zeigen den Wochenverlauf der Effektivwerte der drei Leiter-Erde-Spannungen von Messung 1 und 16. Die Ortsnetzstationen 1 und 16 werden von unterschiedlichen übergeordneten Umspannwerken versorgt. Es liegen ungleiche Versorgungsstrukturen vor. Die Regelsysteme für die Mittelspannungsnetze in beiden Umspannwerken arbeiten im gleichen Spannungsband von 10,2 kV bis 10,6 kV unabhängig voneinander. Beide Messungen zeigen, ungeachtet der Pegel, den nahezu gleichen periodischen

Verlauf. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Effektivwerte der Niederspannungen an der Sammelschiene der Ortsnetzstationen auch durch die gemeinsame übergeordnete Mittelspannung beeinflusst werden.

Diese Erkenntnis ist, in Bezug auf den Einsatz von weiteren Spannungsregelsystemen in der Niederspannung, sehr wichtig und sollte zwingend bei der Planung derartiger Systeme beachtet werden.

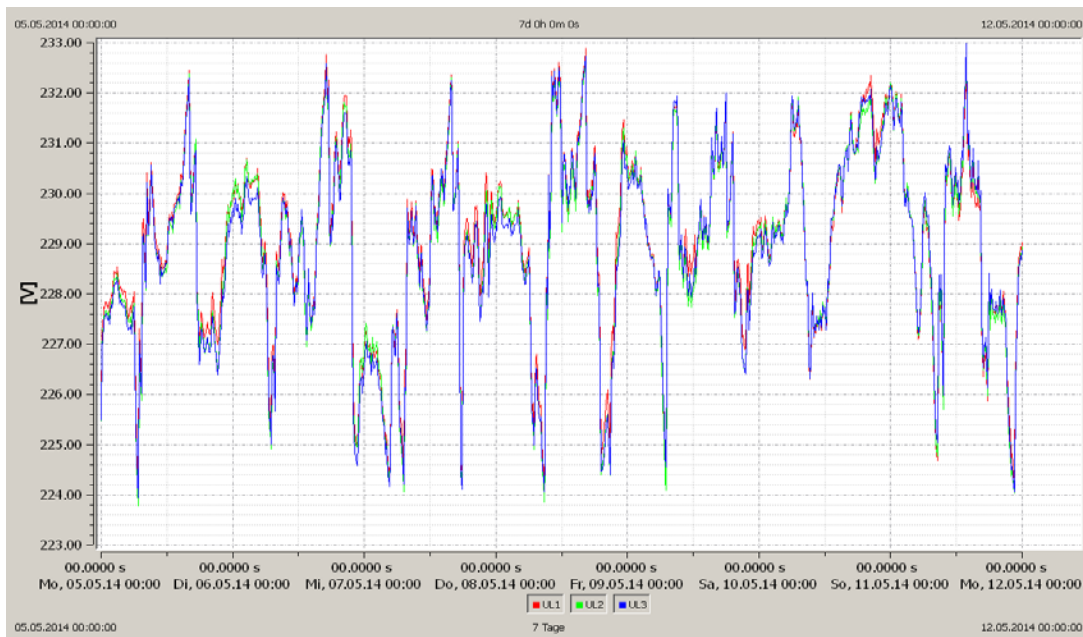


Abbildung 5-86 - Auswertung Wochenverlauf Leiterspannungen L1, L2 und L3 - Messung 1

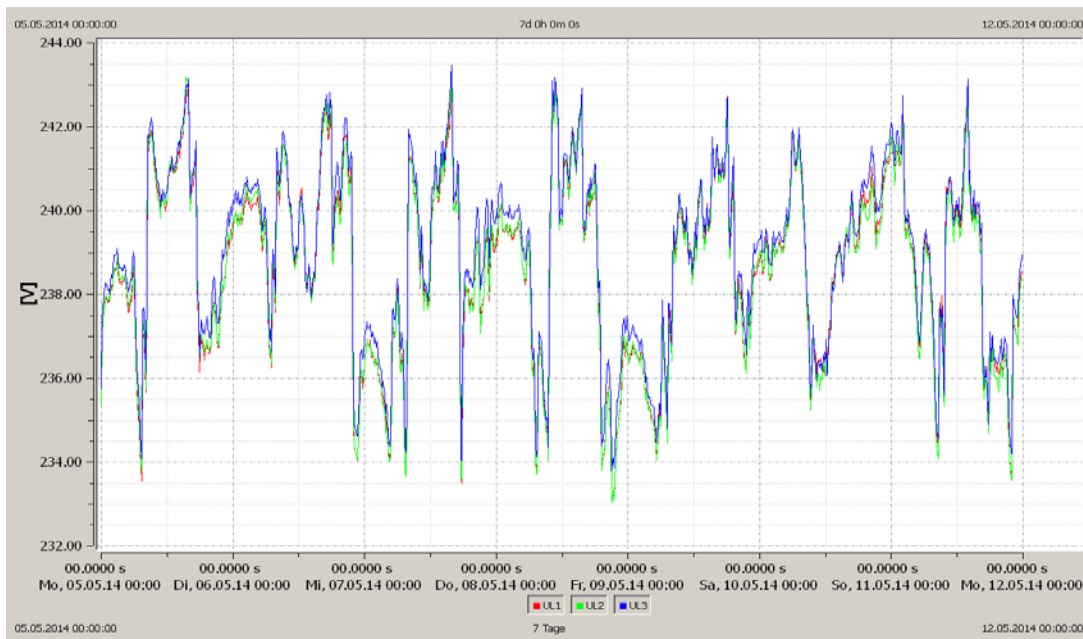


Abbildung 5-87 - Auswertung Wochenverlauf Leiterspannungen L1, L2 und L3 - Messung 16

5.23.2 Frequenz

In allen Messungen wurde keine Verletzung der Frequenz festgestellt.

5.23.3 Spannungsunsymmetrie

Die zulässige Spannungsunsymmetrie nach EN 50160, die durch das Verhältnis vom Gegensystem zum Mitsystem gekennzeichnet ist, beträgt 2%.

Die maximale gemessene Spannungsunsymmetrie betrug 0,35 %. Alle durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die Grenzwerte nicht annähernd erreicht werden.

Ungeachtet der gemessenen geringen Werte ist die Spannungsunsymmetrie ein sehr wichtiges Kriterium der Spannungsqualität, da bereits eine Spannungsunsymmetrie von 2 % zu schädlichen Erwärmungen bei Asynchronmaschinen führen kann.⁶⁷

5.23.4 Flicker

Grenzwertverletzungen des Kurzzeitflickers P_{st} traten in keiner Messung auf.

Die wesentlichen Einflussgrößen sind die relative Spannungsänderung $d(t)$ und die Wiederholrate r die besonders in Gewerbe- und Industriegebieten bzw. beim Neuanschluss dieser beachtet werden müssen.

5.23.5 THD und Harmonische

Alle Messungen haben gezeigt, dass der Grenzwert für den Gesamtoberschwingungsgehalt THD (Total-Harmonic-Distortion) von 8 % eingehalten wurde.

Die Auswertungen der Harmonischen zeigten nach EN 50160 in der Messung 8 erst- und letztmalig, bei insgesamt 18 durchgeführten Messungen, keine normenkonforme Werte.

5.23.6 Erkenntnisse

Die Messung 8 hat gezeigt, dass unabhängig der Bewertung des THD Verletzungen von Harmonischen auftreten können. Im Fall der Messung 8 sind die Verletzungen der 21., 27, und 33. Harmonischen Resonanzerscheinungen zu zuordnen. Diese Resonanzerscheinungen treten vorrangig auf, wenn in Kundenanlagen Kompensationseinrichtungen betrieben werden.

Die Messung 10 hat wiederum bei einem Gewerbekunden gezeigt, dass auch bei sehr kleinen Belastungen erhebliche Anteile an Oberschwingungsströmen, in diesem Fall die 5. Harmonische, auftreten können.

⁶⁷ Vgl. ([43], S. 141)

Die Messung 13 zeigt auf, dass der Betrieb von PV-Anlagen erhebliche Anteile von Harmonischen Oberschwingungen verursachen kann.

In Gewerbebereichen ist daher den Oberschwingungen aber auch dem Flicker größere Beachtung durch den Netzbetreiber beizumessen.

Die Messungen von Wohngebieten, wie z.B., Messung 9 und 11, haben gezeigt, dass sehr viele Parallelen in Verbraucherverhalten und Spannungsqualitätsmerkmalen bestehen. Der 3. Harmonischen Oberschwingung ist hier eine signifikante Rolle zu zuordnen. Deren Anteil liegt teilweise über den Anteil des Nullstroms der Grundschwingung.

Für Bürogebäude gelten die gleichen besonderen Merkmale hinsichtlich der Spannungsqualität wie für Wohngebäude. Allerdings gelten hier andere, mit Bezug auf das Verbraucherverhalten, Verhaltensmuster bzw. zeitliche Verläufe.

Schwierig ist die Beurteilung und Auswertung der Spannungsqualität von Messungen bei denen gemischte Versorgungsstrukturen vorliegen, da hier mehrere Eigenschaften zur Beurteilung der Spannungsqualität gleichzeitig auftreten können.

Aus allen Parametern der Spannungsqualität sind Oberschwingungen hervorzuheben. Deren Ursachen sind sehr vielfältig. Sie treten in allen Versorgungsstrukturen mehr oder weniger auf und müssen daher in zunehmenden Maß durch den Netzbetreiber überwacht werden.

Unter dem Gesichtspunkt des wachsenden Anteils von PV-Anlagen, sinkender Netzdämpfung und der Zunahme nichtlinearer Verbraucher muss davon ausgegangen werden, dass der Aufwand zur Einhaltung der Spannungsqualität und deren Überwachung durch den Netzbetreiber zukünftig steigen wird.

6 Zukünftige messtechnische Anforderungen an Transformatorstationen

In diesem Kapitel werden zukünftige Anforderungen für Transformatorstationen, die sich aus den ausgewerteten Messungen und daraus abgeleiteten Erkenntnissen in Kapitel 5 ergeben haben, beschrieben. Die zukünftigen Anforderungen beziehen sich vordergründig auf Messeinrichtungen an der Niederspannung, abgeleitet aus der Notwendigkeit zur Überwachung der nachgeschalteten Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen.

6.1 Aufbau einer Transformatorstation

Das Übersichtsschaltbild - siehe Abbildung 6-88 - zeigt den momentan typischen vereinfachten Aufbau einer Transformatorstation bestehend aus, Mittelspannungsschaltanlage, Drehstromtransformator und Niederspannungsverteilung.

Neben verschiedenen Überwachungssystemen in der Mittelspannung wird in der Niederspannung derzeit nur der Momentan-Wert des Leiterstroms I_{L2} gemessen und ggf. zur Leittechnik übertragen. Dieses Messinstrument dient ausschließlich zur Information für den Dispatcher der Netzleitstelle und dem Betriebsmonteur bei notwendigen Schalthandlungen im Netz.

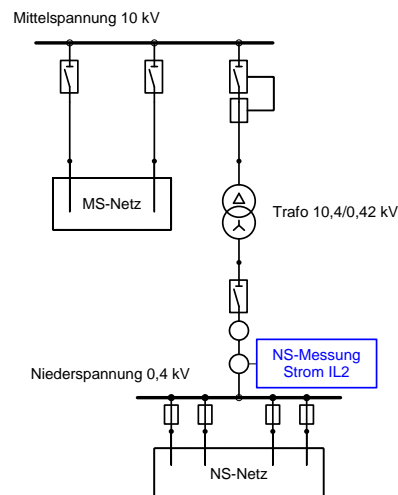


Abbildung 6-88 - vereinfachtes Übersichtsschaltbild Transformatorstation

6.2 Messvarianten

In diesem Abschnitt werden die Vor- und Nachteile einer mobilen und stationären Power-Quality-Messung betrachtet.

6.2.1 Stationäre Power-Quality-Messungen

Die Anordnung der Power-Quality-Messung erfolgt analog der in Punkt 5 durchgeführten Messungen, aber stationär, d.h. die Messgerätetechnik wird in der Einspeisung der Niederspannung fest installiert. Damit wäre eine permanente Aufzeichnung der Spannungsqualität möglich.

Mit den notwendigen Kenntnissen über das Niederspannungsnetz und die Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen ist es möglich eine umfassend aussagekräftige Auswertung und Bewertungen vorzunehmen. Damit würden alle jahreszeitlich bedingten Besonderheiten und Lastschwankungen erfasst.

Ein erheblicher Vorteil wäre, dass mit den permanent zur Verfügung stehenden Messdaten, Unregelmäßigkeiten im Netz unverzüglich ausgewertet und nachvollzogen werden könnten. Bei der Beantwortung von Kundenanfragen könnten die aufgezeichneten Messwerte sehr hilfreich sein.

Für den Fall eines direkten Neuanschlusses von Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen oder für die Erweiterung oder Änderungen im übergeordneten Mittelspannungsnetz würden sofort zuverlässige Informationen zur Verfügung stehen.

Die heutige Messtechnik verfügt über genügend große Datenspeicher, meist Flash-Karten, die es ermöglichen die Messdaten über einen Zeitraum von mehreren Monaten sicher zu erhalten. Für den Fall, dass keine Kommunikationsanbindung zur Datenübertragung besteht, ist somit sichergestellt, dass keine der Messdaten verloren gehen. Ein regelmäßiges Auslesen der Messdaten vorausgesetzt.

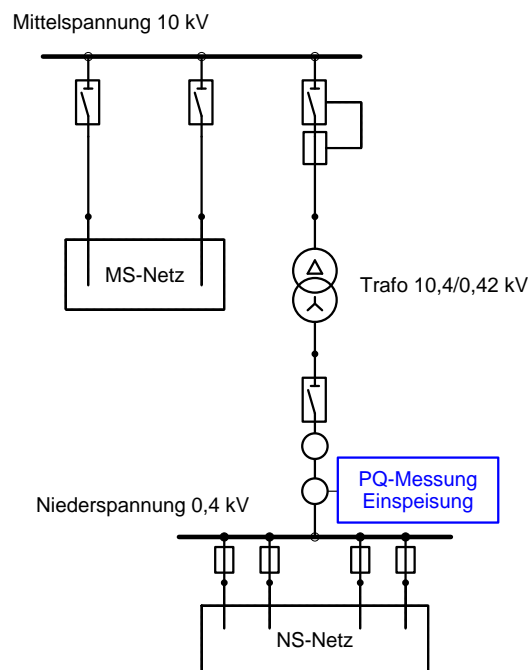


Abbildung 6-89 - PQ-Messungen an der Niederspannung

Die Überlegung weitere Messtechnik in den Abgängen zu platzieren wird nicht betrachtet. Auch wenn damit die Möglichkeit bestände, den Verlauf und das Verhalten von Teilnetzbereichen zu analysieren, ist allein der dafür notwendige finanzielle Aufwand nicht zu rechtfertigen.

6.2.2 Mobile Power-Quality-Messungen

Die Anordnung der Power-Quality-Messung erfolgt analog der in Punkt 5 durchgeführten Messungen. Entsprechend der EN 50160 werden über einen Zeitraum von einer Woche die Messdaten aufgezeichnet. Neben den Messdaten der Spannungsqualität werden die Ströme und die daraus resultierenden Werte an der Sammelschiene der Niederspannung erfasst und gespeichert.

Mit den notwendigen Kenntnissen über das Niederspannungsnetz und die Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen ist es möglich, das haben die durchgeführten und beschriebenen Messungen in Punkt 5 gezeigt, umfassende Auswertungen vorzunehmen und bestimmte charakteristische Merkmale abzuleiten.

Es ist jedoch zu beachten, dass mit dieser Variante alle Verbrauchs- und Erzeugungsbedingten Besonderheiten nicht erfasst werden. So kann es durchaus notwendig sein, die Messungen in Abhängigkeit der jahreszeitlichen Merkmale durchzuführen. Erst dann stehen, für den Fall eines direkten Neuanschlusses von Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen oder für die Erweiterung und Änderung im übergeordneten Mittelspannungsnetz hinreichende Informationen zur Verfügung.

Von Nachteil ist, dass mit temporären Power-Quality-Messungen Unregelmäßigkeiten im Netz nur unzureichend nachvollzogen und ausgewertet können. Das gilt insbesondere für Anfragen aus dem Kundenbereich und deren Beurteilung. Abgesehen von der zusätzlichen Zeit die ggf. für nachfolgende Analysen und Messungen benötigt wird, gestaltet sich deren Beantwortung im Anschluss als schwierig.

Als wesentlicher Vorteil muss der geringere administrative Aufwand und der flexible Einsatz der Messtechnik genannt werden. Die Auswertung und der Vergleich von mehreren Messungen an ein und demselben Messpunkt liefern meist ausreichende Ergebnisse und zeigen tendenziellen Entwicklungen auf.

6.3 Mobile oder stationäre Power-Quality-Messtechnik

Stellt man beide Messungen gegenüber, ist festzustellen, dass der Einbau stationärer Messtechnik einige Vorteile gegenüber der mobilen Messtechnik bieten würde.

Die Frage zu zukünftigen messtechnischen Anforderungen in Transformatorstationen steht deshalb unter den Prämissen von technischer Notwendigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Geht man von den derzeitigen Anschaffungskosten für eine Transformatorstation in der SWE Netz GmbH aus, würde der Einbau einer stationäre Power-Quality-Messung mindestens 20 % und mit einer Kommunikationsanbindung sogar bis zu 30 % zusätzlich Kosten bedeuten.

Auch unter dem Gesichtspunkt steigender Anforderungen an die Spannungsqualität und zukünftiger intelligenter Transformatorstationen bleibt festzustellen, dass diese zusätzlichen oder nachträglichen Investitionen, projektbezogen, unter den momentanen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen nicht realisiert werden können.

Die Auswertung der Messungen in Punkt 5 haben gezeigt, dass unter der Maßgabe ausreichender Netzkenntnisse die Spannungsqualität mit mobiler Messtechnik hinreichend bewertet werden kann. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass gleiche Versorgungsstrukturen Messdaten mit ähnlichen oder vergleichbaren Messergebnissen liefern.

Die kosteneffiziente und effektive Nutzung der Ortsnetzstationen und Niederspannungsnetze gewinnt immer mehr an Bedeutung. Dies erfordert neben dem Qualitätsmerkmal der Spannungsqualität ein flächendeckendes Netzmonitoring über Betriebsmittelzustände, Betriebsmittelbelastungen und Spannungsverhältnisse.

Diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird aus meiner Sicht eine kombinierte Lösung favorisiert. Deren Festlegungen, Vorgehensweise und Organisation sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

6.4 Festlegung der messtechnischen Anforderungen

Um die Spannungsqualität in den Ortsnetzstationen als Netzbetreiber zu überwachen und nachzuweisen wird empfohlen die Power-Quality-Messungen entsprechend dem Organigramm - siehe Punkt 6.5 - mittels mobiler Messtechnik durchzuführen.

Diese Power-Quality-Messungen sind wie bisher auszuwerten und in einer eigens dafür bestehenden zentralen Ordnerstruktur zu verwalten. In einer dazugehörigen zentralen Datenbank sind die Merkmale der einzelnen Qualitätsparameter nach EN 50160 sowie weitere Besonderheiten von jeder Ortsnetzstation zu dokumentieren.

Für die Erfassung von Betriebsmesswerten ist in allen Ortsnetzstationen in der Einspeisung der Niederspannung ein Universalmessgerät zu installieren. Dieses Messgerät weist größere Messtoleranzen auf und erfüllt damit nicht die Anforderungen eines Power-Quality-Messgerätes.

Als Mindestanforderungen an das Universalgerät gelten die in nachfolgender Tabelle aufgestellten Daten. Darüber hinaus muss das Universalmessgerät über eine Kommunikationsschnittstelle verfügen, welches ermöglicht die Messwerte auf das zentrale Netzleitsystem zu übertragen und weiter zu verarbeiten.

Messgröße	Mindest-Anzeigebereich	Messeingang	L1	L2	L3	Summen- Werte	Minimal- wert	Mittel- Wert	Maximal- Wert	Mess- genauigkeit
Spannung L-N	0...9999 V	direkt	•	•	•		•	•	•	=+ - 0,2 %
Spannung L-L	0...9999 V	direkt	•	•	•		•	•	•	=+ - 0,2 %
Strom	0...9999 A	1 oder 5 A	•	•	•		•	•	•	=+ - 0,5 %
Strom N	0...9999 A	1 oder 5 A	•	•	•		•	•	•	=+ - 0,5 %
Wirkleistung	0...9999 kW		•	•	•		•	•	•	=+ - 0,5 %
Blindleistung	0...9999 kVAr		•	•	•		•	•	•	=+ - 0,5 %
Scheinleistung	0...9999 kVA		•	•	•		•	•	•	=+ - 0,5 %
Wirkleistung Σ	0...9999 kW					•	•	•	•	=+ - 0,5 %
Blindleistung Σ	0...9999 kVAr					•	•	•	•	=+ - 0,5 %
Scheinleistung Σ	0...9999 kVA					•	•	•	•	=+ - 0,5 %
cos phi	0,00 kap. bis 1 bis 0,00 ind.					•				=+ - 1 °

Tabelle 6-4 - Mindestanforderung Universalmessgerät - Netzmonitoring

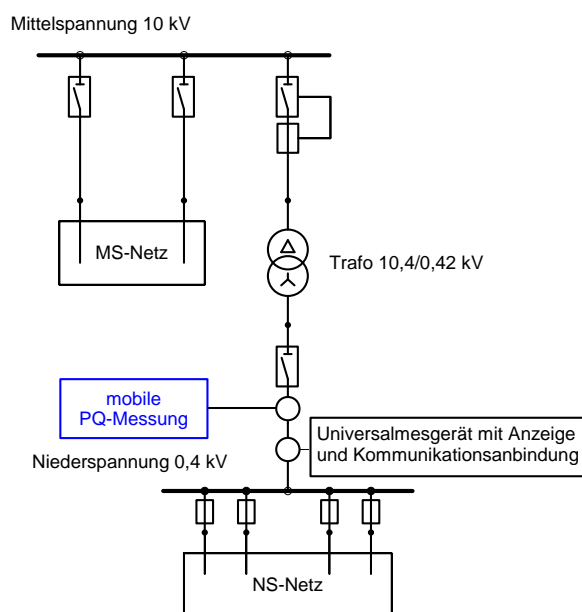


Abbildung 6-90 - Schema - PQ-Messung und Universalmesgerät

Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass für die primär- und sekundärtechnische Anpassung der standardisierten Niederspannungsverteilungen Änderungsplanungen in den entsprechenden Richtlinien notwendig sind.

6.5 Vorgehensweise und Organisation

Die Durchführung von mobilen Messungen ist in Abhängigkeit der Versorgungsstruktur, des Versorgungsgebietes, Netzveränderungen, dem Anschluss von Verbraucher- und Erzeugungsanlagen und der Kenntnis von bestimmten tendenziellen Entwicklungen zu organisieren.

Setzt man die 976 Stationen und Ortnetzstationen der SWE Netz GmbH als Ausgangsgröße an, könnte jede bei 20 vorhandenen Messgeräten theoretisch mindestens einmal

pro Jahr - ein Wochenintervall - gemessen werden. Dies ist jedoch aufgrund personeller begrenzter Kapazitäten praktisch nicht umsetzbar.

Unter der Maßgabe, die Spannungsqualität umfassend im gesamten Versorgungsnetz aus Sicht der Ortnetzstationen zu bewerten, sollte die Einhaltung der Spannungsqualität in regelmäßigen Abständen in allen Stationen und Ortnetzstationen überprüft werden.

Für eine zielgerichtete prinzipielle Vorgehensweise, und als praktisch umsetzbar, wird für die SWE Netz GmbH ein Zyklus von 2 Jahren zur Durchführungen von Power-Quality-Messungen vorgeschlagen. Dies immer unter den Voraussetzungen, dass keine Unregelmäßigkeiten auftreten oder technischen Veränderungen vorgenommen wurden oder werden sollen.

Das nachfolgende Organigramm soll als Überblick dienen die verschiedenen Kriterien zu berücksichtigen.

Organigramm zur Durchführung mobiler Power-Quality-Messungen
in Ortsnetzstationen der SWE Netz GmbH

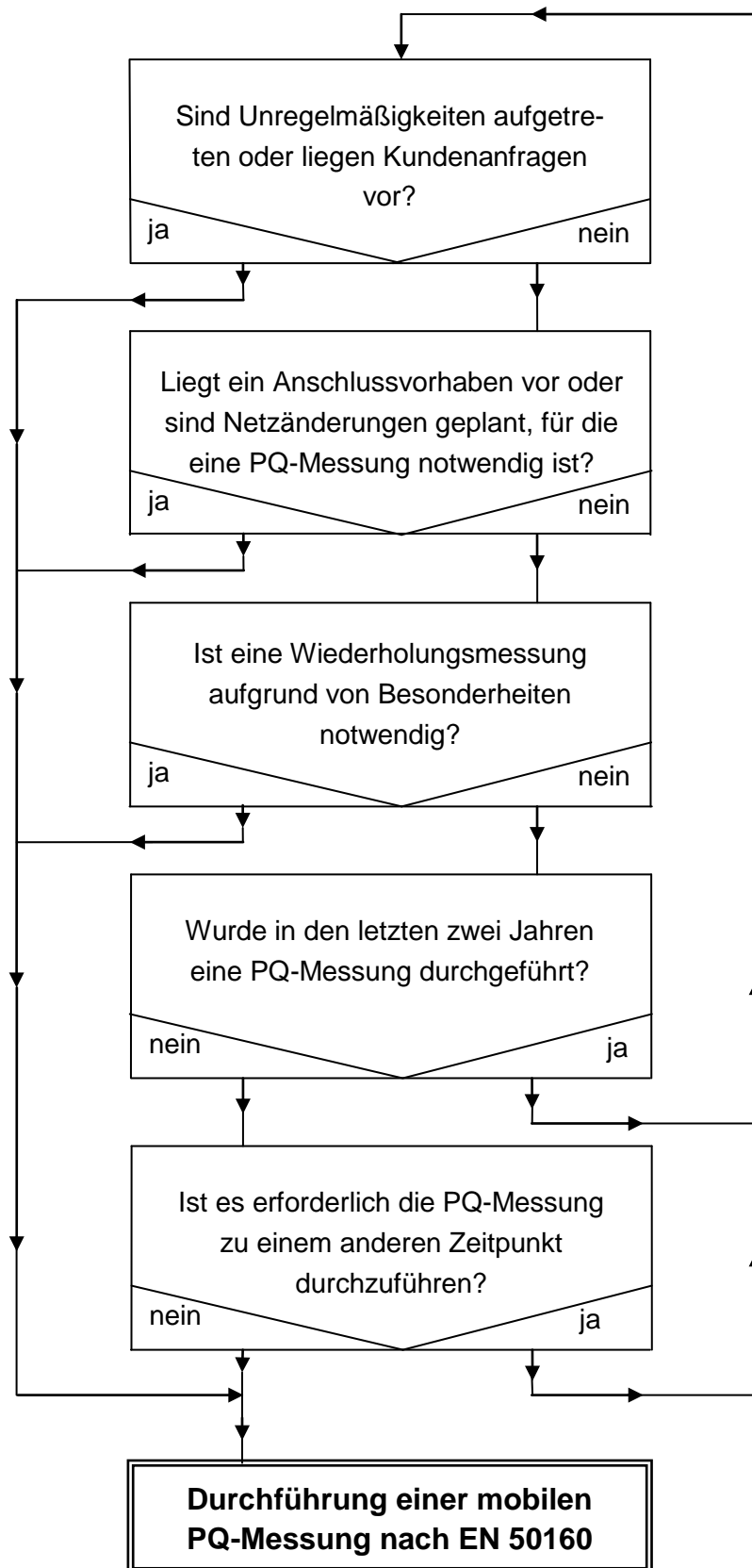


Abbildung 6-91 - Organigramm Power-Quality-Messungen

7 Fazit und Ausblick

Im abschließenden Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung und Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse. In einem Ausblick zeigt der Autor die aus seiner Sicht notwendigen mittelfristigen Maßnahmen auf.

7.1 Fazit

Die Diplomarbeit befasst sich mit der Auswertung von PQ-Messungen an Transformatorstationen eines ausgewählten Mittelspannungsringes um damit zukünftige messtechnische Anforderungen in der Niederspannung an Transformatorstationen zu definieren.

In den ersten Abschnitten wurde die Bedeutung der Spannungsqualität als Teil der Versorgungsqualität für eine sichere und zuverlässige Energieversorgung beschrieben. Anhand der EN 50160 wurden die Merkmale der Spannungsqualität erläutert. Die Anforderungen an die Messtechnik für PQ-Messungen wurden mit der EN 61000-4-30 beschrieben.

Im Abschnitt 5 wurden die einzelnen Messungen ausgewertet, die Spannungsqualität beurteilt und kennzeichnende Parameter hervorgehoben.

Mit dem Normbericht nach EN 50160 wurden die relevanten Parameter der Spannungsqualität nach EN 50160 dargestellt und bewertet.

Die Auswertungen der Messungen haben jedoch gezeigt, dass für das Herausarbeiten besonderer Merkmale und Eigenschaften eines nachgeschalteten Versorgungsnetzes die Notwendigkeit besteht, eine systematische Untersuchung der einzelnen Messung vorzunehmen. Hierbei können die Parameter der Ströme und Leistungen sowie Kenntnisse über die Versorgungsstruktur sehr von Nutzen sein.

Anhand der Auswertung der Spannungspegel konnte dargelegt werden, dass die Netzspannung in Transformatorstationen deutlich durch die übergeordneten Netzebenen beeinflusst werden. Dieses Erkenntnis ist in Bezug auf die viel diskutierten Möglichkeiten der Spannungshaltung in der Niederspannung insbesondere bei der Berechnung solcher Möglichkeiten von Bedeutung.

Flickerwerte müssen in der Niederspannung vor allem dann beachtet werden, wenn in verzweigten Netzstrukturen kleinere Gewerbetpartner versorgt werden oder versorgt werden sollen.

Unter allen Merkmalen der Spannungsqualität nehmen die zunehmenden Anteile von Oberschwingungen eine kennzeichnende Rolle ein. Offensichtlich ist, dass zeigen alle Messungen, der zunehmende Einfluss von Verbrauchern mit nichtlinearer Strom- und Spannungscharakteristik aber auch von PV-Anlagen.

Im Abschnitt 6 wurden aus den Ergebnissen und Erkenntnissen der Messungen die zukünftigen messtechnischen Anforderungen an der Niederspannung an Transformatorstationen abgeleitet und festgelegt.

Es konnte anhand der durchgeführten Messungen bestätigt werden, dass ähnliche Versorgungsstrukturen, vergleichbare Spannungsqualitätsmerkmale liefern.

Mit den Messauswertungen wurde nahezu durchgängig die Einhaltung der Spannungsqualität repräsentativ nachgewiesen werden. Die Messung 8 hat jedoch gezeigt, dass es zwingend notwendig ist, die Spannungsqualität im gesamten Versorgungsnetz der SWE Netz GmbH regelmäßig zu überprüfen und zu protokollieren.

Weiter wurde um die zukünftigen messtechnischen Anforderungen in der Niederspannung in Transformatorstationen zu bestimmen, eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von mobiler und fest installierter PQ-Messtechnik vorgenommen.

Der Aufwand für den Aufbau und die Bearbeitung eines festinstallierten flächendeckenden PQ-Messsystems gab letztendlich den Ausschlag, zukünftig die Spannungsqualität in Transformatorstationen mittels mobiler Messtechnik nachzuweisen. Für eine strukturierte Verfahrensweise wurde ein Organigramm erstellt, welches als Grundlage zur Durchführung von PQ-Messungen mittels mobiler Messtechnik in Transformatorstationen dienen soll.

Die festinstallierten messtechnischen Anforderungen in Transformatorstationen der SWE Netz GmbH beziehen sich zukünftig vordergründig auf das Monitoring von Spannung-, Strom- und Leistungswerten. Diese Messwerte werden zudem zukünftig für Statistiken, Prognosen und Lastsimulationszwecke weiter verwendet.

7.2 Ausblick

Mit den gesetzlichen Gegebenheiten wird sich der Trend des wachsenden Energieerzeugungsanteils aus EE in den untergeordneten Netzebenen weiter fortsetzen. Der Einsatz von Verbrauchern mit nichtlinearer Spannung-Strom-Charakteristik wird ebenso zunehmen. Gleichzeitig wird die Netzdämpfung, u.a. durch die in der EU-Verordnung vorgeschriebenen Mindestanforderungen für Leuchtmittel, abnehmen. Zudem muss durch die Netzbetreiber die Entwicklung der Thematiken Energiespeicher und Elektromobilität mit verfolgt werden.

All diese Elemente werden perspektivisch zunehmend die Spannungsqualität und das Betriebsregime des Netzes der SWE Netz GmbH beeinflussen.

Um als Netzbetreiber nicht nur reagieren sondern agieren zu können bedarf es zukünftig, zur Sicherung der Spannungsqualität, einer vertiefenden und gezielten Zusammenarbeit zwischen Netzbetreiber und Anschlussnehmern.

Die SWE Netz GmbH als Netzbetreiber wird sich dieser Aufgabe stellen müssen, Messsysteme aufzubauen und zu betreiben, die es ermöglichen Messdaten übersichtlich zu aggregieren und weiter zu verarbeiten.

Die Messdaten in der Niederspannung sind hier nur ein kleiner aber wichtiger Teil.

Literatur

- [1] Dirk Blume, Jürgen Schlabbach, Thomas Stephanblome, Spannungsqualität in elektrischen Netzen, Berlin, VDE Verlag, 1999
- [2] <http://www.eeg-aktuell.de/das-eeg/>, verfügbar am 28.04.2014
- [3] <http://www.bee-ev.de/Energieversorgung/Energievorsorgung.php.>, verfügbar am 29.04.2014
- [4] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1807/umfrage/erneuerbare-energien-anteil-der-energiebereitstellung-seit-1991/>, verfügbar am 29.04.2014
- [5] <http://www.swe-netz.de/pb/site/netz/node/419979/Lde/index.html.>, verfügbar am 29.04.2014
- [6] https://www.stadtwerke-erfurt.de/pb/site/swegruppe/get/documents/swe/Dokumente/Konzern/Allgemein/Daten%20&%20Fakten/SWE-Zahlen-und-Fakten-2011_neu.pdf, verfügbar am 29.04.2014
- [7] <http://www.swe-netz.de/pb/site/netz/node/419569/Lde/index.html.>, verfügbar am 29.04.2014
- [8] http://www.swe-netz.de/pb/site/netz/get/documents/netz/Dokumente/Stromnetz/EEG/Statistik%20EEG%202012/EEG_JA_2012.pdf., verfügbar am 06.05.2014
- [9] Schwab Adolf J., Elektroenergiesysteme, 19. Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [10] Schwab Adolf J.; Elektroenergiesysteme, Elektrische Energie, Lebensstandard, Versorgungssicherheit. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [11] Schwab Adolf J.2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme, Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [12] Schwab Adolf J., 2.2 Elektroenergiesysteme Bild 2.4 Hierrarchische Struktur eines Elektroenergiesystems, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [13] Schwab Adolf J., Elektroenergiesysteme, Transport und Übertragung elektrischer Energie, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [14] Schwab Adolf J., 2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006

- [15] <http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105.html>., verfügbar am 20.05.2014
- [16] <http://www.erneuerbare-energien.de/die-themen/netzintegration-erneuerbarer-energien/>, verfügbar am 21.05.2014
- [17] <http://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet/Seiten/versorgungsqualitaet.aspx>, verfügbar am 21.05.2014
- [18] DIN EN 50160, 1.1 Anwendungsbereich, VDE-Verlag, 02.2011
- [19] DIN EN 50160, 1.2 Zweck Seite 6, VDE-Verlag, 02.2011
- [20] <http://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet/Seiten/spannungsqualitaet.aspx>. VDE FNN, verfügbar am 21.05.2014
- [21] Dirk Blume, Jürgen Schlabbach, Thomas Stephanblome, Spannungsqualität in elektrischen Netzen, Berlin, VDE Verlag, 1999
- [22] DIN EN 50160, 1.1 Anwendungsbereich Seite 5, VDE-Verlag, 02.2011
- [23] DIN EN 50160, 4.2.5 Oberschwingungsspannung, VDE-Verlag, 02.2011
- [24] Dirk Blume, Jürgen Schlabbach, Thomas Stephanblome, Spannungsqualität in elektrischen Netzen, Berlin, VDE Verlag, 1999
- [25] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Technische Mindestanforderungen. VDE FNN, 08.2011
- [26] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Zulässige Spannungsänderung, VDE FNN, 08.2011
- [27] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Netzurückwirkungen, VDE FNN, 08.2011
- [28] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Schnelle Spannungsänderung, VDE FNN, 08.2011
- [29] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Flicker, VDE FNN, 08.2011
- [30] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Oberschwingungen und Zwischenharmonische, VDE FNN, 08.2011
- [31] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Blindleistung, VDE FNN, 08.2011
- [32] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Grundsätze für die Festlegung des Netzanschlusspunktes, VDE FNN, 08.2011

- [33]. Zeitschrift ETG Mitgliederinformationen, 7, (07.2014).
- [34] <http://www.a-eberle.de/de/download-center/viewcategory/45-bedienungsanleitungen.html> Seite 19, verfügbar am 16.06.2014
- [35] <http://www.a-eberle.de/de/download-center/viewcategory/45-bedienungsanleitungen.html> Seite 17, verfügbar am 16.06.2014
- [36] <http://www.a-eberle.de/de/download-center/viewcategory/45-bedienungsanleitungen.html> Seite 21, Verfügbar am 16.06.2014
- [37] EN 61000-4-30 2009-9 Elektromagnetische Verträglichkeit - Verfahren zur Messung der Spannungsqualität, VDE-Verlag, 09.2009
- [38] http://elektret.github.io/docs/herleitung_effektivwerte.pdf, verfügbar am 29.08.2014
- [39] <http://www.diesteckdose.net/forum/archiv/attachments/00000000462/Oberschwingungen.pdf>, verfügbar am 24.06.2014
- [40] Detlef Schulz, Netzurückwirkungen- Theorie, Simulation, Messung und Bewertung, 1. Auflage, Berlin-Offenbach: VDE-Verlag, 2004
- [41] <http://www.a-eberle.de/de/download-center/viewcategory/45-bedienungsanleitungen.html> Seite 17, verfügbar am 24.06.2014
- [42] [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/0cb8394a97bc4979c1256c6b004c4f2e/1016cd3399bd99ffc1256c550026948d/\\$FILE/THFOP-DE.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/0cb8394a97bc4979c1256c6b004c4f2e/1016cd3399bd99ffc1256c550026948d/$FILE/THFOP-DE.pdf), verfügbar am 27.08.2014
- [43] Dirk Blume, Jürgen Schlabbach, Thomas Stephanblome, Spannungsqualität in elektrischen Netzen, Berlin, VDE Verlag, 1999
- [44] <http://antriebstechnik.fh-stralsund.de:1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Antriebstechnik/Praxis/Oberschwingungen.pdf>, verfügbar am 30.07.2014
- [45] http://www.pes.ee.ethz.ch/fileadmin/user_upload/pes/IE4_EinunddreiphasigeDiodengleichrichtung_Script.pdf, verfügbar am 21.08.2014

Anlagen

Teil 1 Eingabedaten des Mittelspannungsringes	A-1
Teil 2 Messgrößen und Funktionen PQ Box 100 expert	A-2
Selbstständigkeitserklärung	A-3

Anlagen, Teil 1

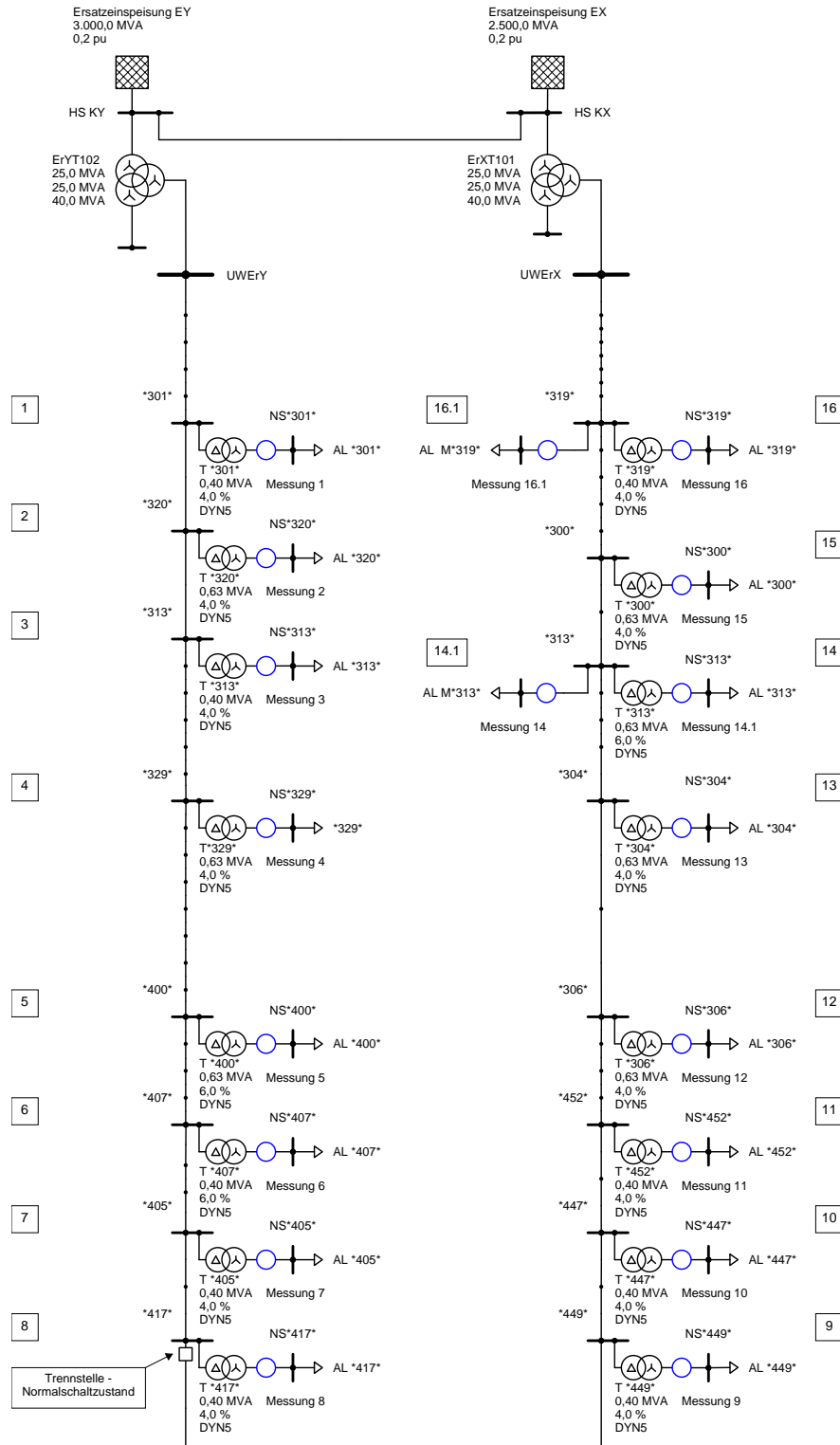


Abbildung A-1-92 - Eingabedaten Mittelspannungsring

Anlagen, Teil 2

Messgrößen / Funktionen			
PQ-Box 100	basic (B0)	light (B1)	expert (B2)
Statistik nach EN50160 / IEC61000-2-2; -2-4		x	x
PQ Ereignisse		x	x
Aufzeichnung freies Intervall:	x	x	x
Spannung: Mittel-, Min.- Max-Wert	x	x	x
Strom, Mittel, Max-Wert	x	x	x
Leistung: P, Q, S, PF, cos phi, sin phi	x	x	x
Verzerrungsblindleistung D	x	x	x
Energie: P, Q, P+, P-, Q+, Q-	x	x	x
Flicker (Pst, Plt, Ausgang 5)		x	x
Unsymmetrie	x	x	x
Spannungsharmonische		bis 50.	bis 50.
Stromharmonische		bis 50.	bis 50.
Phasenwinkel der Harmonischen		bis 50.	bis 50.
THD U und I; PWhd U und I; PHC	x	x	x
Zwischenharmonische-Gruppen Spannung, Strom		DC bis 5kHz	DC bis 5kHz
Rundsteuersignal		x	x
Frequenz	x	x	x
15 (30) Min Leistungswerte P, Q, S, D, cos phi, sin phi	x	x	x
Online Modus:			
Oszilloskopbild	x	x	x
10ms Effektivwertrekorder	x	x	x
Spannungs- Stromharmonische	x	x	x
Zwischenharmonische Gruppen (U, I)	x	x	x
Richtung der Harmonischen	x	x	x
Triggerfunktionen (Rec A / Rec B)			
Manueller Trigger über Taste		x	x
Effektivwert-Trigger Unter- Überschreitung (U, I)			x
Effektivwert-Trigger Sprung (U, I)			x
Phasensprungtrigger			x
Hüllkurventrigger			x
Automatik Trigger			x
Option Rundsteueranalyse Rekorder - Optional	x	x	x

Abbildung A-2-93 - Messgrößen und Funktionen der PQ-Box 100 expert⁶⁸

⁶⁸ Vgl. ([36], 2014)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Herbsleben, den 8. September 2014

Uwe Sarbach